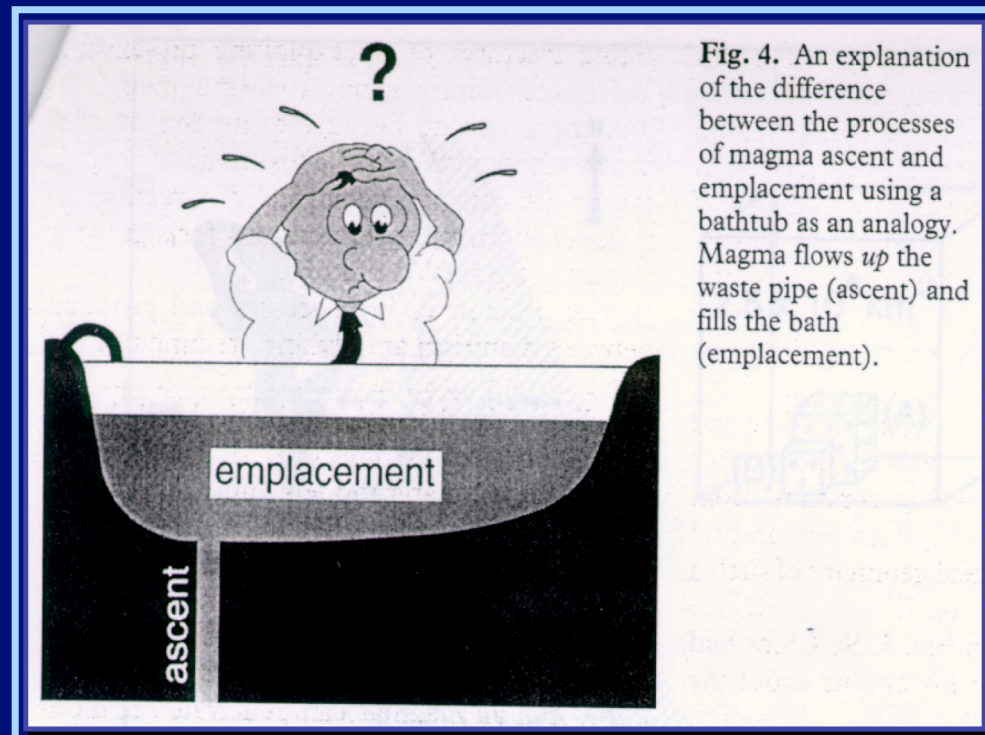


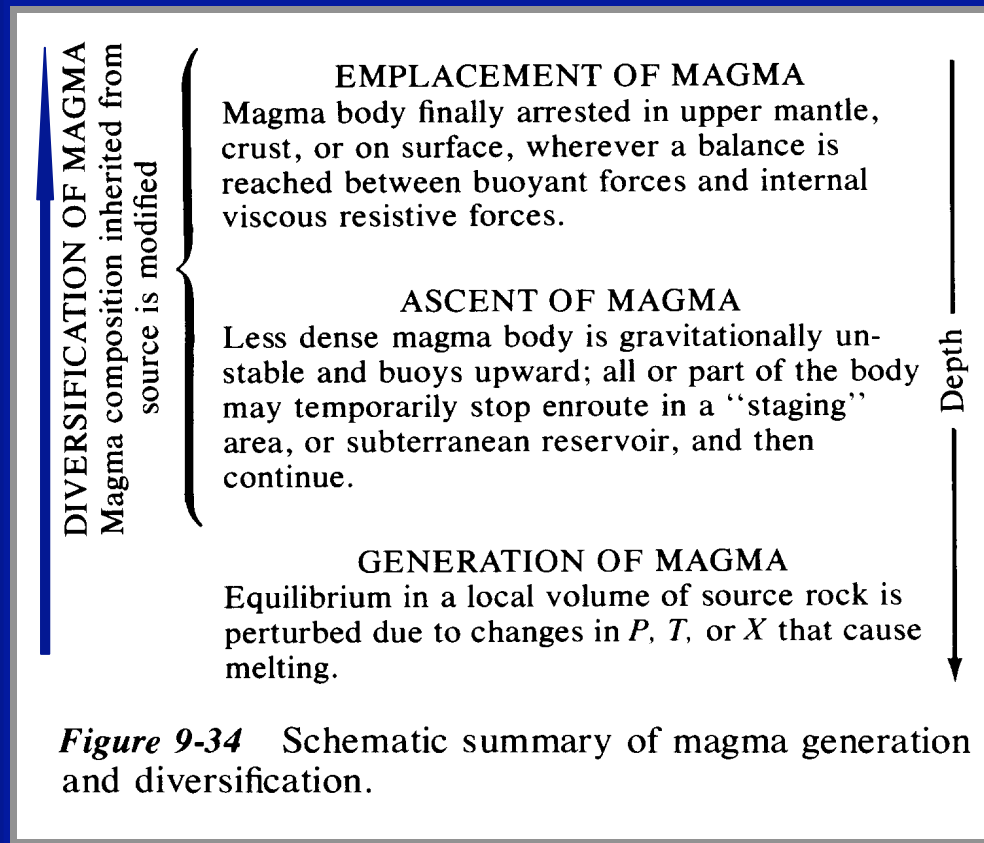


7-8 Generazione, risalita e messa in posto dei magmi Corpi intrusivi



Petford & Clemens (2000):
Geology Today, Sept-Oct 2000/181

I. Generazione e risalita dei magmi



(after Best, 1982)

Approfondimenti in : J.B. Bouchez et al. (eds). Granite: from Segregation of Melt to Emplacement Fabrics. Kluwer, 1997.

Generazione e risalita dei magmi

- Localizzazione del fuso: *dove?*
- Segregazione del fuso: *quando?*
- Risalita dei magmi: *perché?*

✓ Localizzazione del fuso: *dove?*

➤ Quando in una sorgente potenziale (mantello o crosta) si raggiungono le condizioni P-T idonee, il primo fuso si localizza al *contatto* tra cristalli dei minerali costituenti la roccia sorgente corrispondenti a *Xeutettiche*/"melting points"(T_f min)

✓ Fusione parziale in un sistema ternario: primo fuso *Xeutettica* ($T_{\text{fusione min}}$)

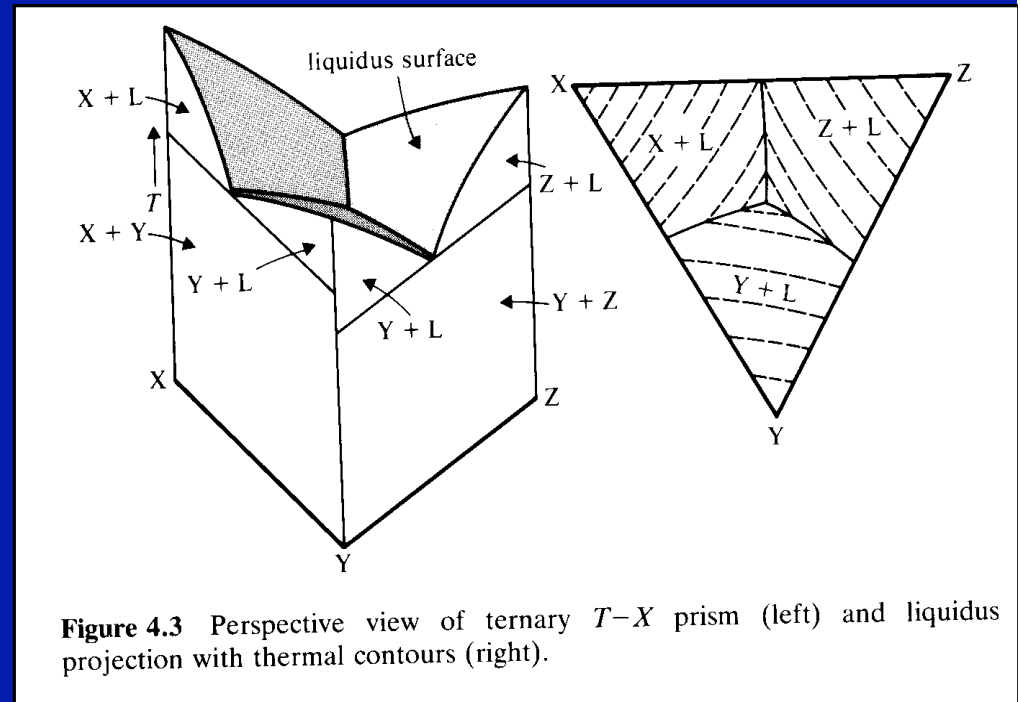
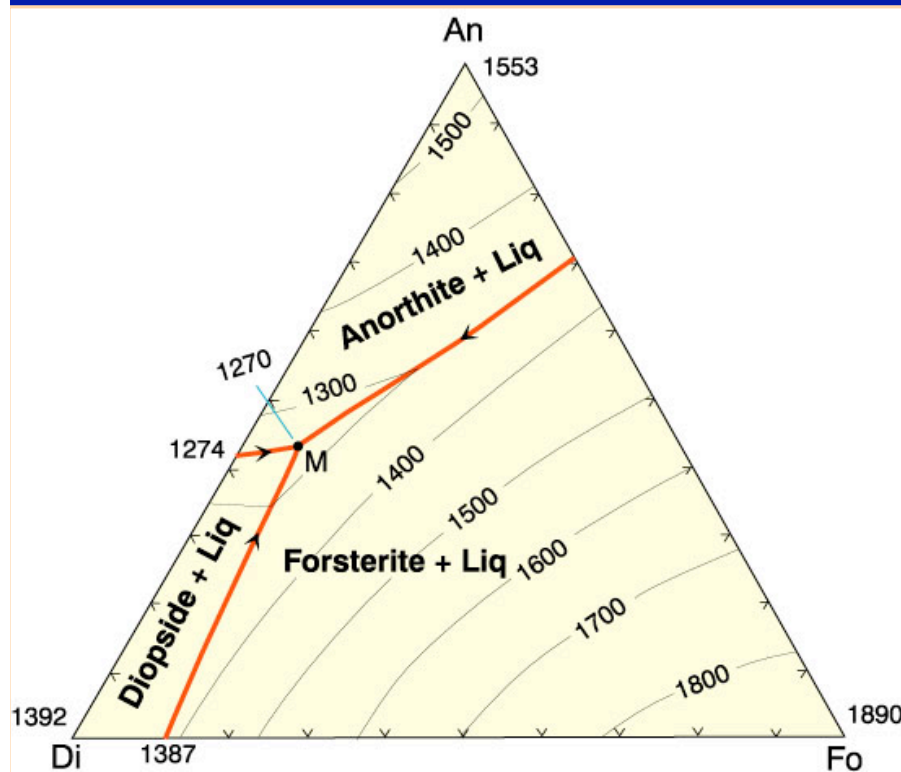


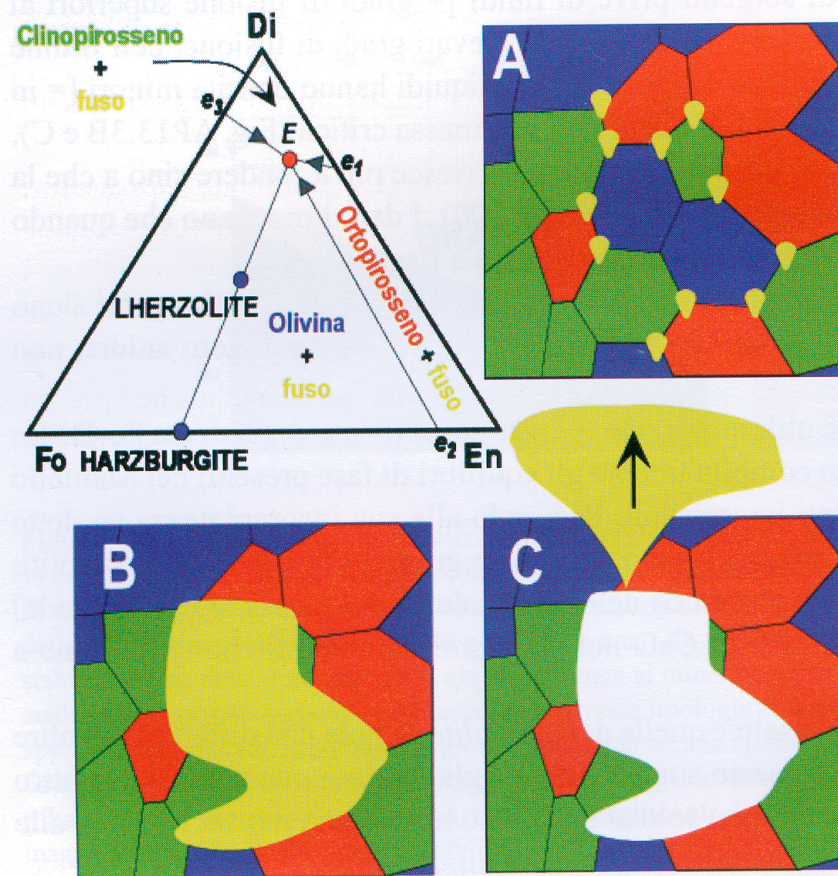
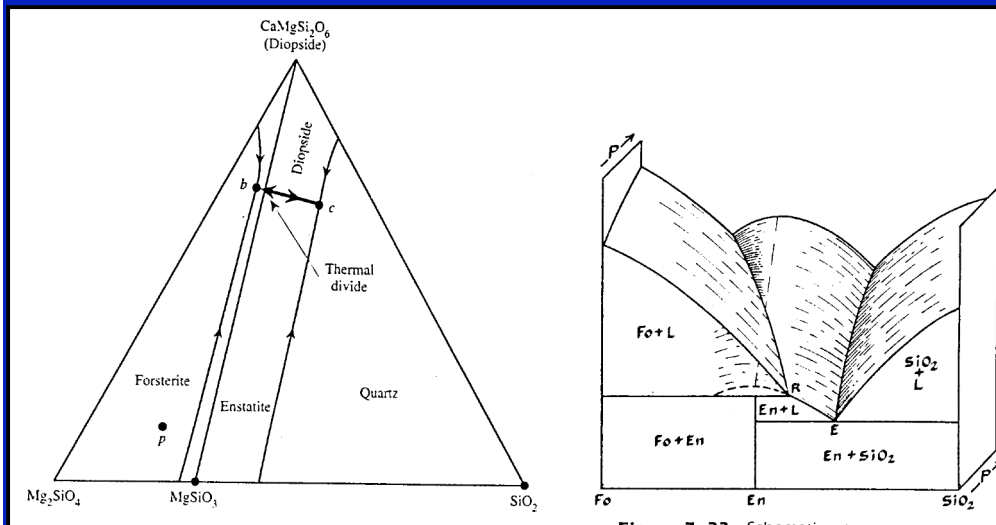
Figure 4.3 Perspective view of ternary T - X prism (left) and liquidus projection with thermal contours (right).

(after Cox et al., 1979)

(after Winter, 2001)

✓ Fusione parziale: localizzazione del fuso

Sistema Fo-Di-Silice ad HP
*sistema modello per l'origine
dei magmi basaltici*



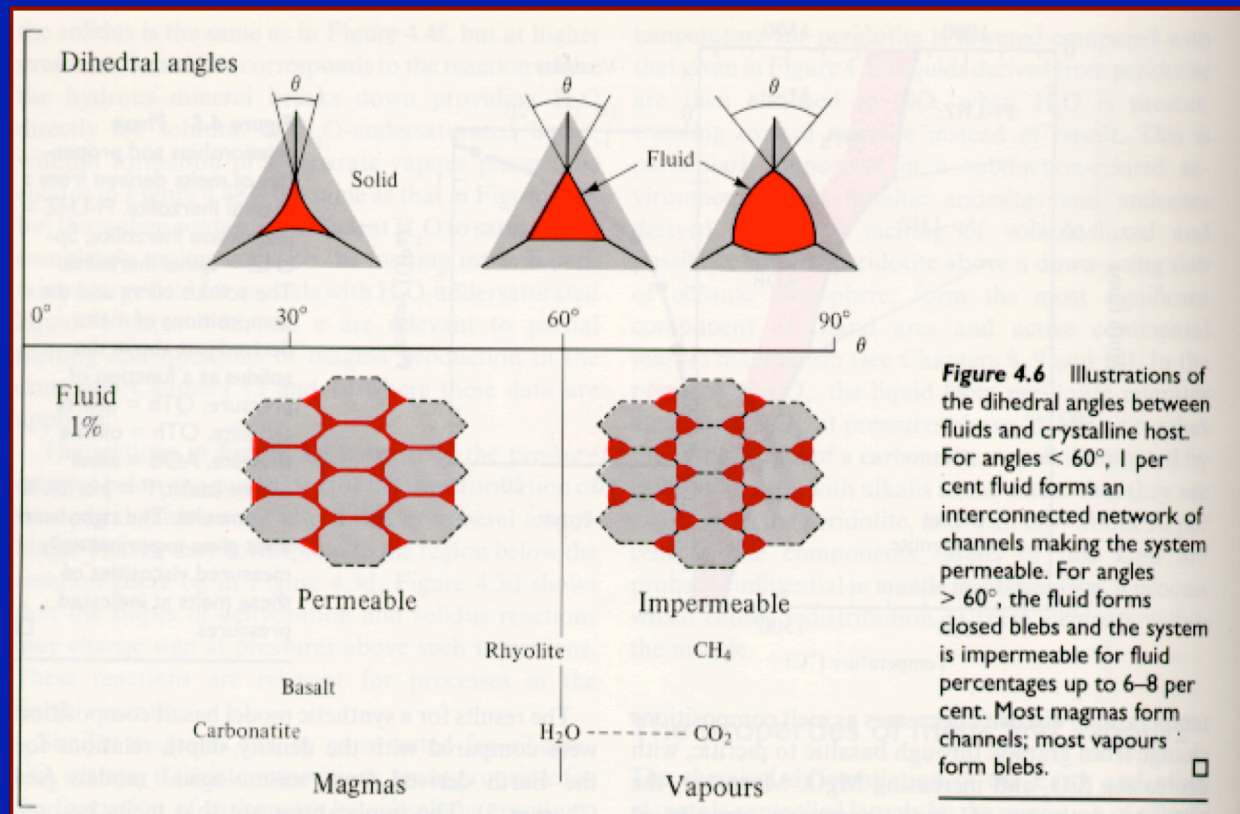
(Morbidelli 2005)

✓ Distribuzione del fuso in un aggregato granulare

- La distribuzione del fuso dipende dalla sua “*bagnabilità*” che è misurata dall’angolo diedro ϑ tra fuso e cristalli
- Esigenza termodinamica: le “gocce” di fuso tendono ad assumere la configurazione cui corrisponde la minima $G_{interfacciale}$

$\vartheta = f(\text{natura fasi solide e } X_{\text{fase fluida}})$

- Per valori di $\theta < 60^\circ$ si ha una interconnessione tra le “gocce” di fuso presenti nella matrice cristallina (*rete di canali interconnessi*) e la sorgente (mantello/crosta) diventa permeabile rendendo possibile l'estrazione del fuso dalla matrice



Wyllie (1992)

✓ Segregazione del fuso

- Sotto l'azione della “*gravità*” i magmi tendono a migrare dalle *zone di origine/accumulo* a quelle di *messa in posto*
- La migrazione dei magmi prevede due aspetti/momenti (Ranalli, 1993):
 - segregazione del fuso (separazione dal residuo cristallino/matrice)
 - trasporto del magma verso zone più superficiali e *meccanismi* relativi (diapiri vs. dicchi)

✓ Segregazione del fuso: *quando?*

- Il mantello diventa permeabile consentendo la *segregazione fuso-matrice* una volta raggiunta una % critica di fuso (RCMP)* che varia in funzione di
 - ✦ T
 - ✦ viscosità
 - ✦ X
 - ✦ Shear
- Studi sperimentali (unsheared lherzolite) suggeriscono valori di **3-5%** per magmi basaltici (Maaloe, 1985). Possibilità che magmi K-ricchi a bassa viscosità possano segregarsi a più basse % F (<1%; McKenzie, 1989)

* 15-30% in magmi acidi

✓ Risalita dei magmi: *perché*

- I magmi sono generalmente *meno densi* delle rocce incassanti/sovrastanti ($\rho_{\text{magma}} = 0.9 \times \rho_{\text{roccia}}$) e, sotto l'azione della gravità, tendono a *risalire* nella litosfera portandosi verso zone di minore pressione
- La *velocità di risalita* può variare di molti ordini di grandezza in f:
 - *meccanismo di risalita*
(dicco vs. diapiro: 0.1-1.0 m/s vs. 0.1-50 m/a)
 - *proprietà fisiche del sistema*
(X, stato fisico, contenuto in volatili, etc.)

✓ Risalita dei magmi - Forza di galleggiamento

La *forza di galleggiamento (buoyancy)* è la causa principale della risalita dei magmi nella litosfera. Sotto l'azione della gravità, in presenza di un *gradiente di P*, i magmi tendono a risalire fino al livello di “*neutral buoyancy*” ($P_{\text{mag}} = P_{\text{lith}}$) (*processo ideale*) che dipende:

- i) dalla *profondità* della sorgente (H)
- ii) dal *contrasto di densità* magma-rocce ($\Delta\rho$)

$$P_{\text{mag}} = P_{\text{lith}}$$

$$\rho_{\text{magma}} g \times (H) = \rho_{\text{rocce}} g \times (H)$$

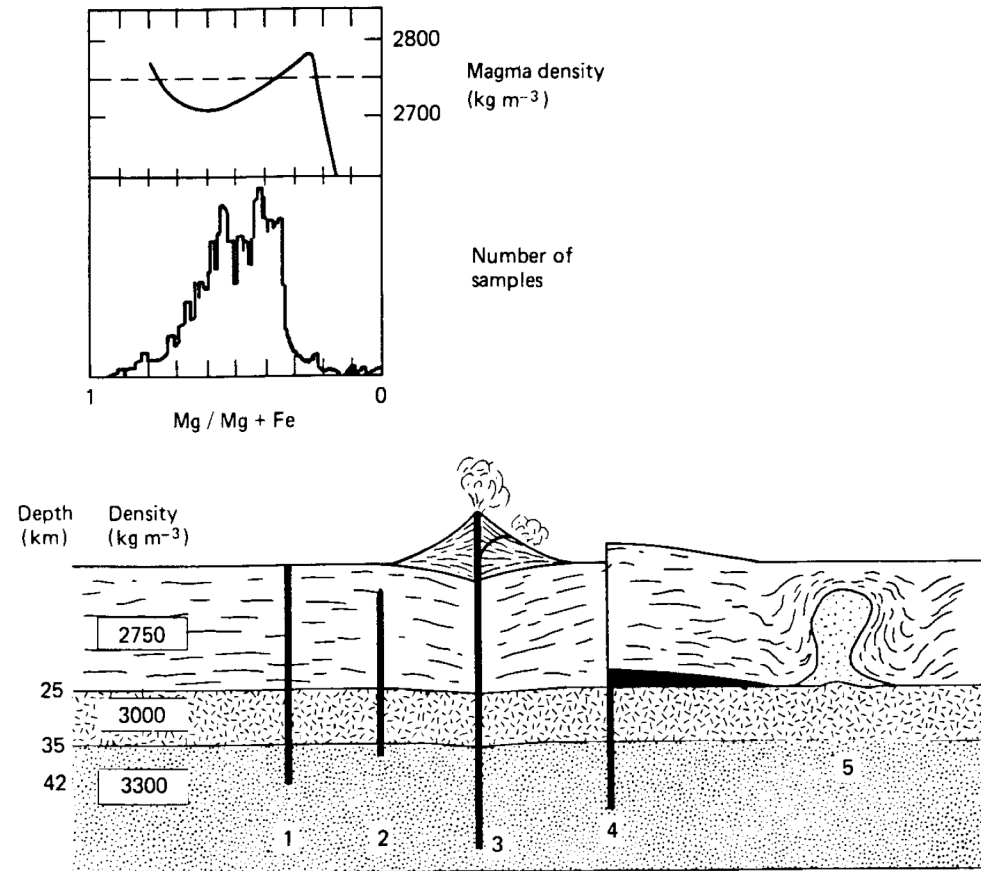


FIGURE 3-1 A section of continental crust and upper mantle showing the depths to the source region from which magma with a density of 2.9 Mg m^{-3} must buoyantly rise along tension fractures to be able to just reach the surface of the Earth (1), intrude to some level within the crust (2), build a volcano of dense rocks on the surface (3), or intrude along the base of the upper crust raising the lighter rocks above it (4). Being less dense than most crustal rocks, granitic magma (5) is able to rise through and forcefully displace the overlying rocks. Also shown is the variation in density of melts derived by partial crystallization of basaltic magmas as a function of the molecular ratio of $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{FeO})$ in the melt; the abundance of the continental basaltic rocks drops off sharply where the density of the melts go above the average density of the upper crust (2.75 Mg m^{-3}), suggesting that the crust acts as a density filter for dense magmas. [After Stolper and Walker (1980).]

Philpotts (1990)

- ✓ Il meccanismo di *risalita per galleggiamento* “funziona” molto bene per *magmi granitici* (5) che hanno una $\rho < \rho_{\text{rocce crostali}}$ e per *magmi ricchi in volatili come kimberliti e carbonatiti*.
- ✓ I *magmi basaltici* più densi, in assenza di fratture, *tendono ad arrestarsi* in profondità (4)

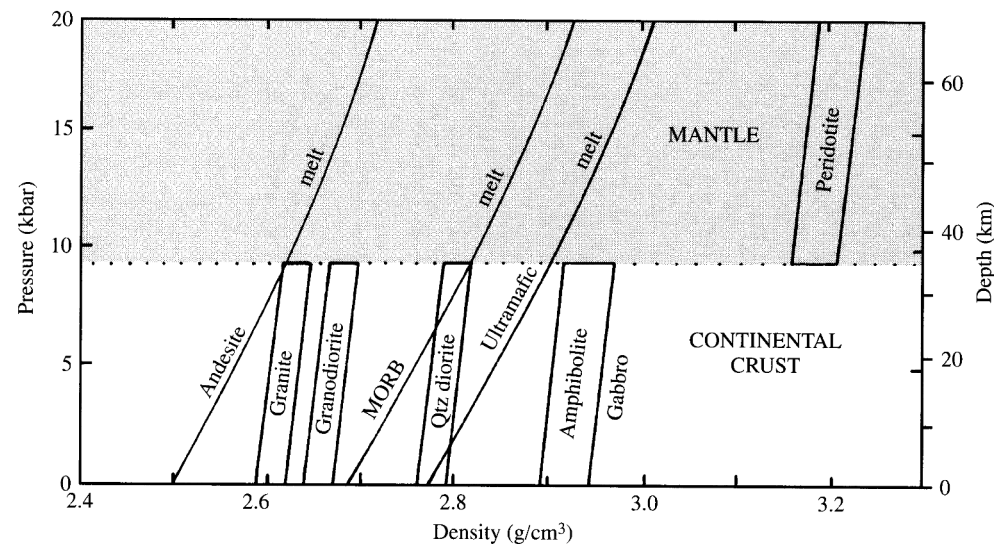
✓ In *ambiente oceanico* magmi basaltici ricchi in olivina (*picriti*) tendono a risalire per forza di galleggiamento fino al livello di “*neutral buoyancy*” che corrisponde ad una profondità di ca.1-3 km, dove possono ristagnare e accumularsi (Ryan, 1994)

Moho sismica →
 Moho petrologica →
 Mantello superiore →

Lithology	Ocean Crustal Layers	Typical Ophiolite	Normal Ocean Crust	
		Thickness (km)	ave.	P wave vel. (km/s)
Deep-Sea Sediment	1	~ 0.3	0.5	1.7 - 2.0
Basaltic Pillow Lavas	2A & 2B	0.5	0.5	2.0 - 5.6
Sheeted dike complex	2C	1.0 - 1.5	1.5	6.7
Gabbro	3A	2 - 5	4.7	7.1
Layered Gabbro	3B			
Layered peridotite	4	up to 7		8.1
Unlayered tectonite peridotite				

(after Winter, 2001)

- ✓ La *crosta continentale* è più eterogenea della crosta oceanica ed ha densità variabile da 2.2 a 2.9 gcm⁻³, con un valore medio di 2.75gcm⁻³
- ✓ Funziona come un *filtro di densità* per magmi con $\rho > 2.750 \text{ gcm}^{-3}$ che tendono a ristagnare alla base (*magma underplating*) o a intrudersi nella crosta inferiore espandendosi lateralmente (*magma intraplating*)



9.1 Density relations between some rock compositions and volatile-free melts in the continental crust and uppermost mantle. Range of densities for rock types is indicated in rectangular boxes. Note the smaller compressibilities of rocks compared to melts as P (depth) increases. MORB, mid-ocean ridge basalt. Amphibolite is a metamorphic rock composed of hornblende and plagioclase that is formed by recrystallization of mafic igneous rocks (basalt, gabbro) under hydrous conditions. (Redrawn from Herzberg et al., 1983.)

❖ Paradossalmente, i magmi basaltici riescono a risalire nella crosta continentale fino ad estrudersi

❖ In questo caso, in aggiunta alla forza di galleggiamento, è necessario far riferimento a *fattori aggiuntivi*, quali la presenza di una *fase fluida* che provoca *una diminuzione* della ρ_{magma}

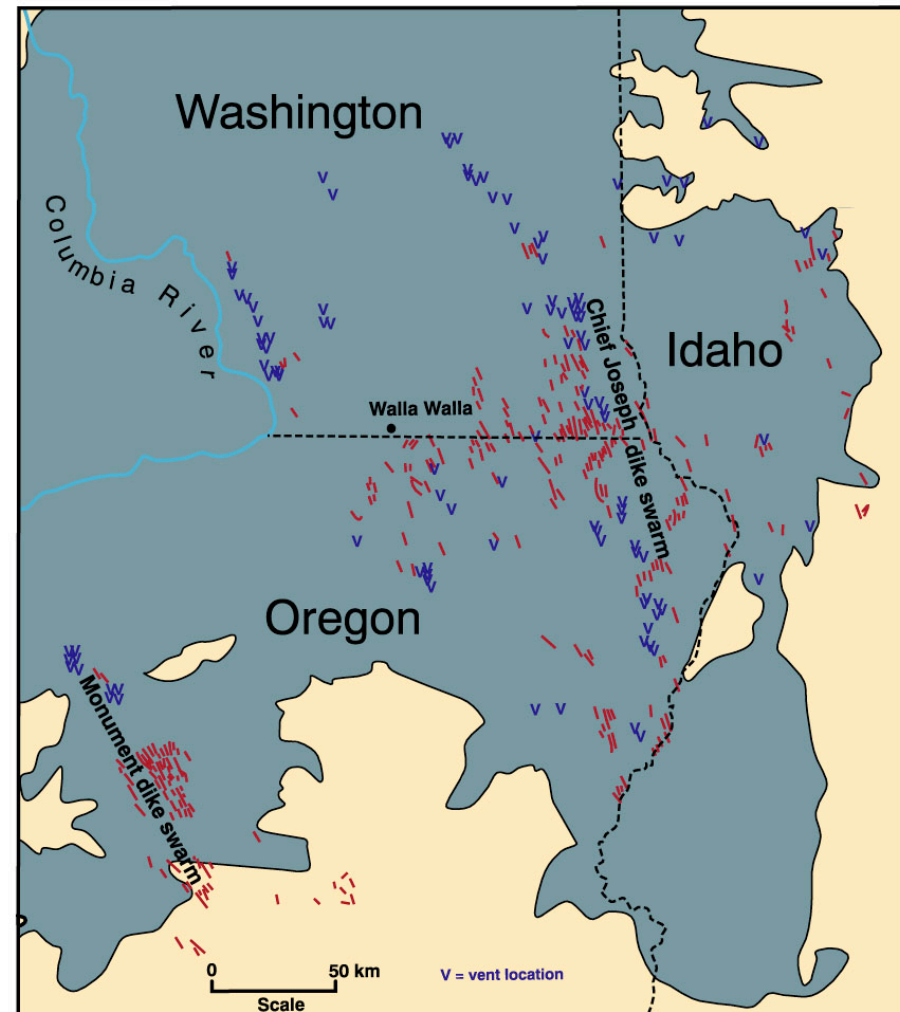
✓ **Esempio: Columbia River Flood Basalts (CFB)**
(età Miocenica: 17-6Ma; volume totale di magmi eruttati:
174.000 - 224.000 km³, il 94% dei quali eruttati in 1 Ma)

basalti tholeiitici ricchi in Fe

❖ **Interpretazione:**

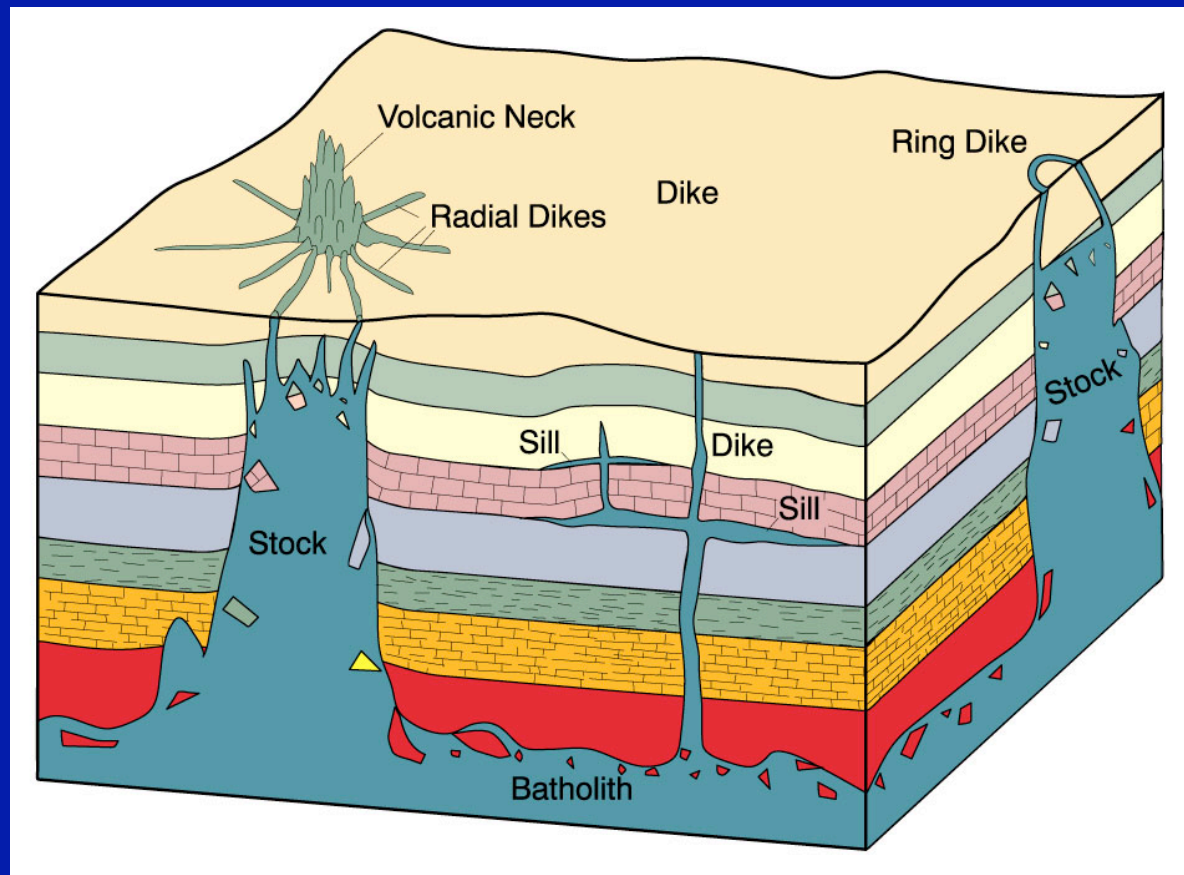
presenza di una fase fluida
(H₂O+CO₂) in quantità >
4wt% che, abbassando la
densità del magma, ha reso
possibile la risalita da una
profondità >20 km e l'eruzione
in superficie

(R.A. Lange (2002): Geology,
30/2,179-182; after Winter 2001)



II. Corpi intrusivi

Relazioni con le rocce adiacenti. Struttura, forma e dimensioni. Zonature compositive. Tempi di messa in posto e solidificazione



(after Winter, 2001)

Corpi intrusivi: relazioni con le rocce adiacenti

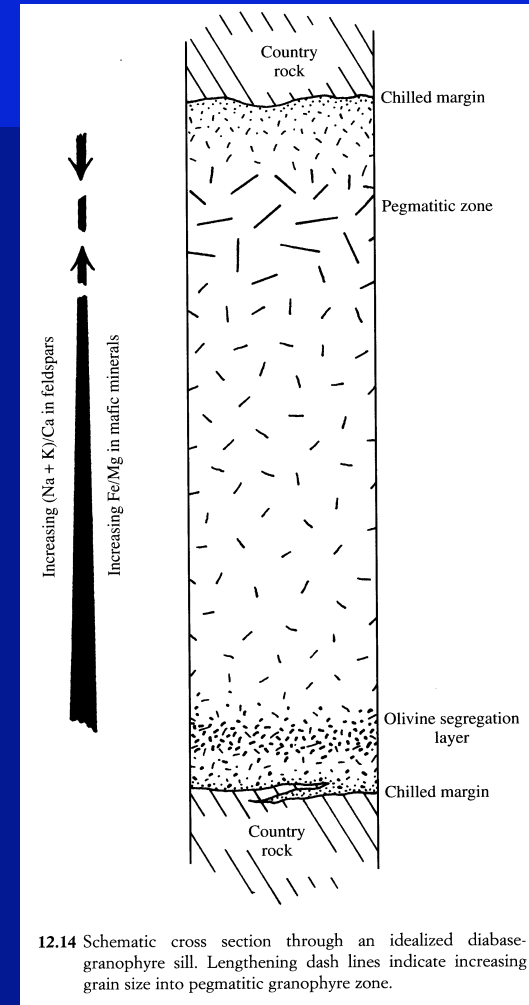
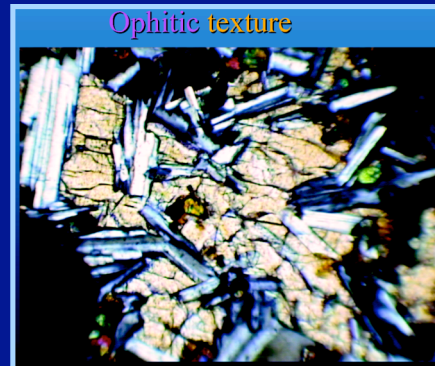
- ✓ **concordanti:** si formano per intrusione dei magmi lungo superfici di strato o di foliazione
- ✓ **discordanti:** hanno uno sviluppo indipendente da quello delle anisotropie delle rocce incassanti, *tranciando superfici di strato e foliazioni*
- ❖ I corpi intrusivi di maggiori dimensioni intrusi a varie profondità nella crosta vengono denominati genericamente **plutoni**

★ Sill (filoni-strato): corpi tabulari *concordanti* generalmente suborizzontali

- **spessore:** da pochi *m* a centinaia di *m*
- **composizione:** doleritica*

*diabase/dolerite: roccia di *composizione basaltica* a struttura *ofitica*

after Winter, 2001)



Palisades sill localizzato sul fianco destro del fiume Hudson nei pressi di New York City (spessore di 300 m e lunghezza di 80 km, *strutturalmente e composizionalmente zonato*; Fig. 12.14, after Best 2003) (v. *Appendix*)

● **Dicchi (*filoni*):** corpi *discordanti* -sia verticali che fortemente inclinati- con pareti subparallele

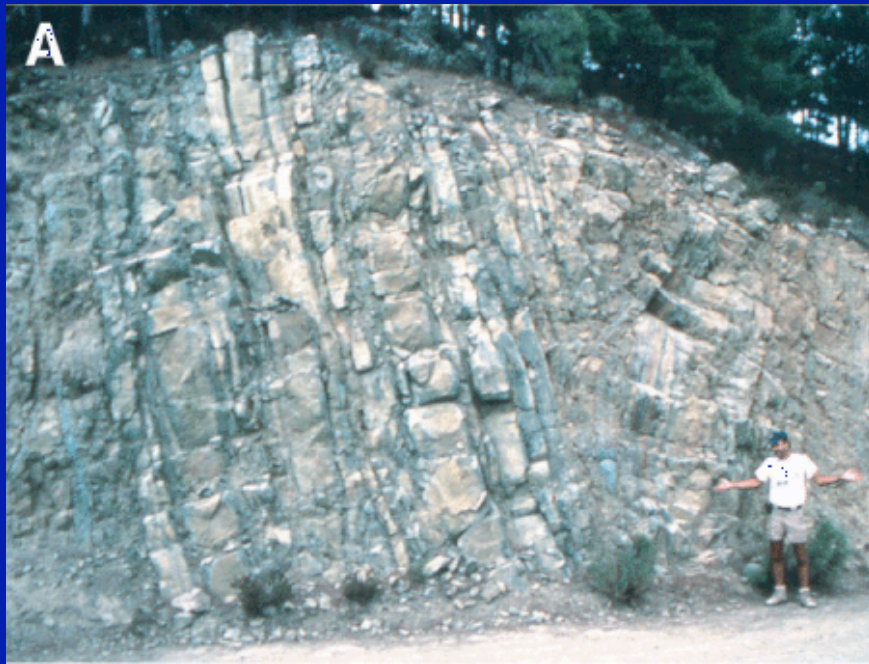
- hanno *forma tabulare* con spessore variabile da alcuni decimetri sino a decine di metri
- possono essere seguiti in affioramento per parecchi chilometri (es. Penisola Iberica: dicco Alentejo-Placencia SW-NE ca. 400 km)

Intrusioni Ignee: dicchi (o filoni)

In questo caso uno sciame di dicchi scuri (di composizione basaltica) taglia rocce più antiche (in questo caso un granito).



● **Dicchi:** corpi *discordanti* -sia verticali che fortemente inclinati- con pareti subparallele



(A) **Sheeted dikes** of the Cretaceous Troodos Ophiolite, Cyprus. Dikes are tabular intrusions (few cm up to 0.5m in this outcrop) of magma with no intervening screens of other host rock.

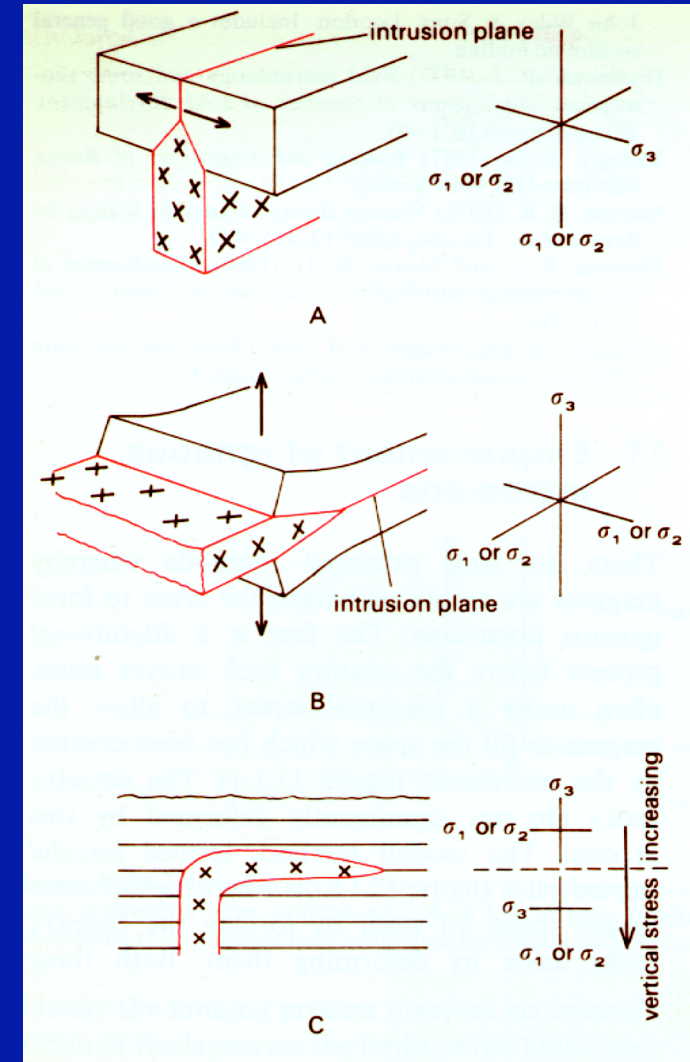
(B) Clos-up view of **sheeted dikes** showing contact relationships.

The presence of a sheeted complex implies an approximate balance between spreading rate and magma supply. Such a balance appears to exist at mid-ocean ridges. (Robinson et al., 2008: GSA Today, 18/11, 4-10.

✓ Dicchi vs. Sill



(Lustrino, 2007)

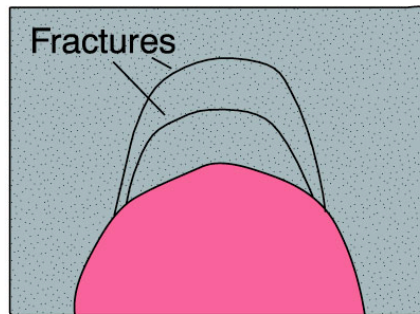


(after Park, 1983; v. Appendix)

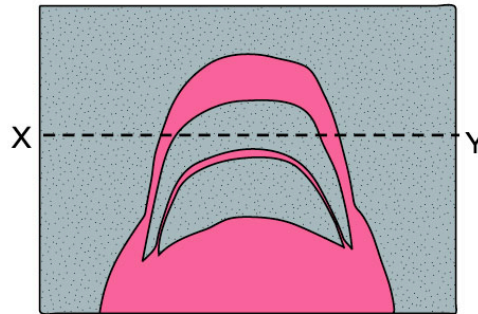
✓ Dicchi ad anello (*ring dikes*) e dicchi a cono (*cone sheets*)

Tertiary (66-54 Ma) volcano-plutonic
Province of the British Isles

Cross -sections of Ring Dike

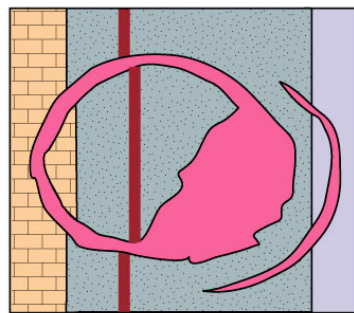


a



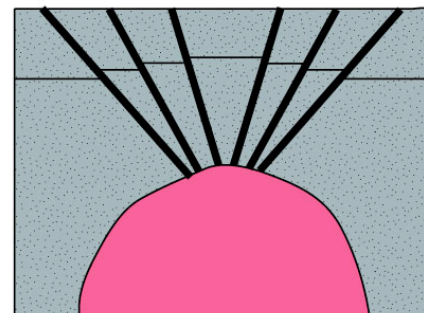
b

Map View of Ring Dike

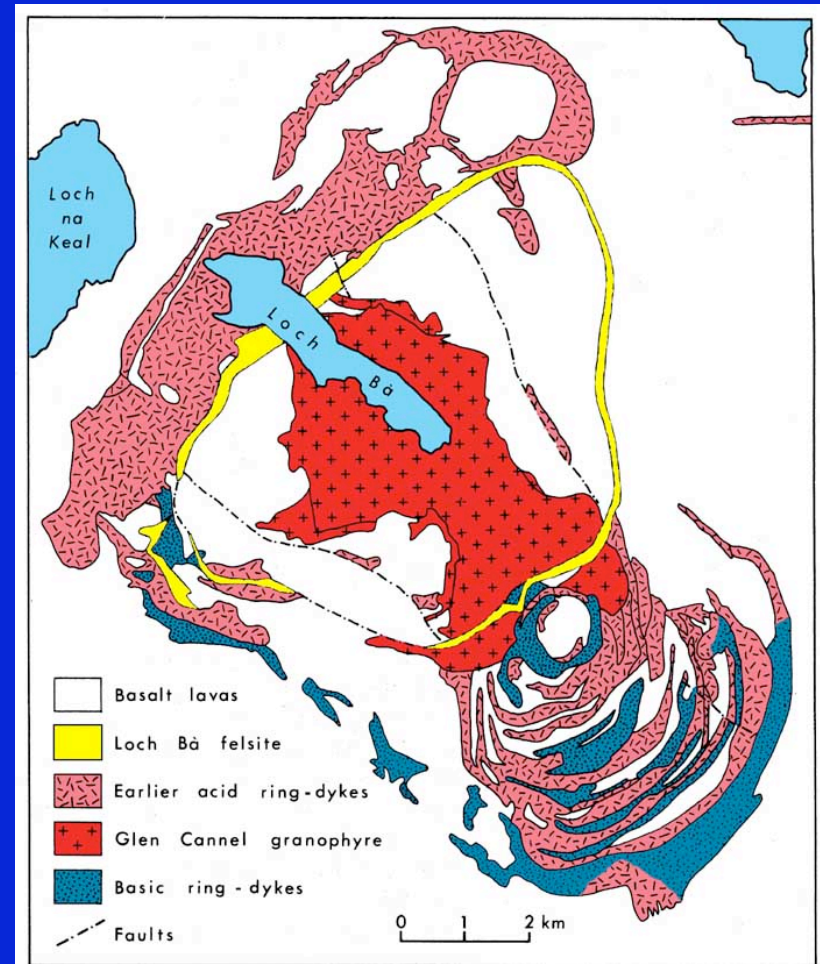


c

Cone Sheet



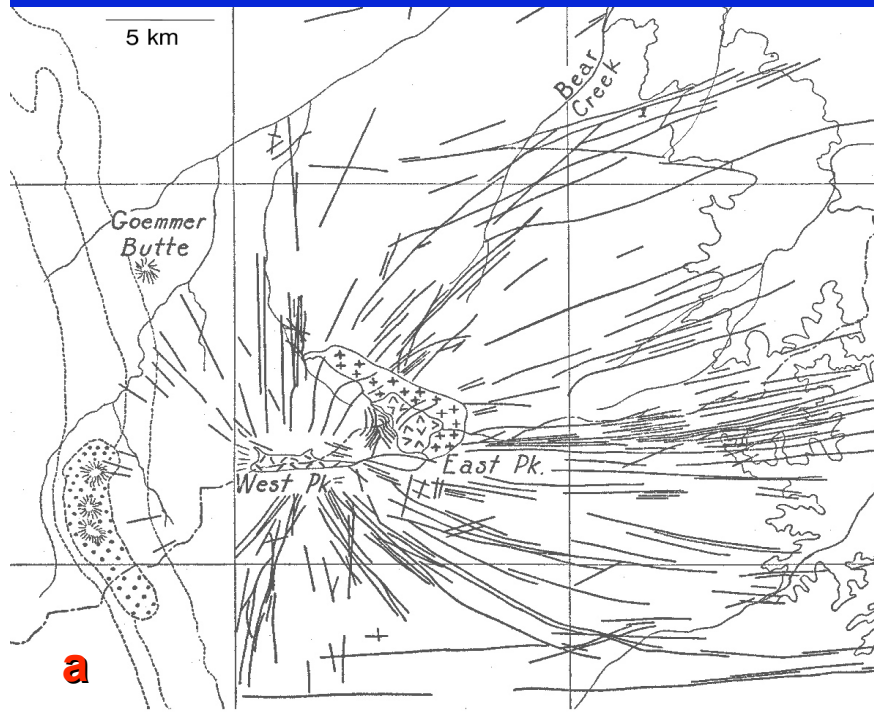
d



v. Appendix

Map of *ring dikes*, Island of Mull, Scotland.
After Bailey *et al.* (1924) in Winter (2001)

★ Campi o sciami filoniani (*dike swarms*)



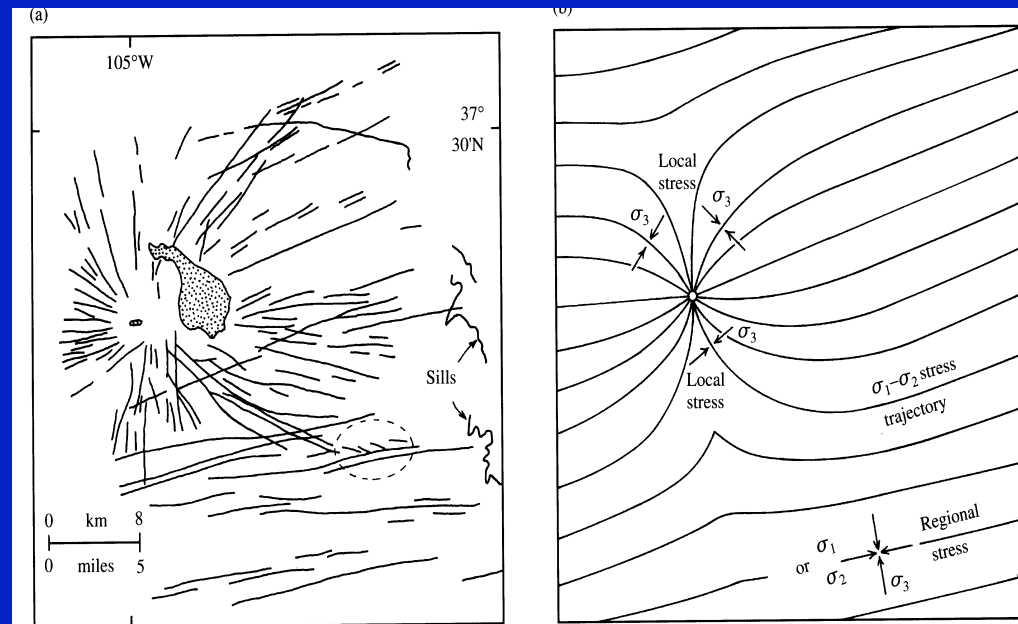
Neck: condotto di alimentazione, messo a nudo dall'erosione, costituito generalmente da lava

a. Radial dike swarm around Spanish Peaks, Colorado. After Knopf (1936), *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **47**, 1727-1784. **b.** Eroded remnant of a volcanic neck with radial dikes. Ship Rock, New Mexico. From John Shelton © (1966) *Geology Illustrated*. W. H. Freeman. San Francisco. (after Winter, 2001) (v. Appendix)

✓ Campi o sciami filoniani (dike swarms)

formazione di fratture (contesto fragile) in risposta allo *stato di stress regionale* (fratture // al piano $\sigma_1\sigma_2$ che si aprono nella direzione di σ_3)

L'andamento dei dicchi può diventare *radiale* per effetto di un *campo di stress locale*, dovuto ad un'intrusione, che si sovrappone al campo di stress regionale. I dicchi hanno composizione basaltica e possono avere lunghezza > 2000 km



9.6 **Radial and parallel dike swarms.** (a) Subvertical dikes were emplaced at 28 to 20 Ma around **central intrusions** of the Spanish Peaks (stippled) in south central Colorado. Flow markers (aligned tabular phenocrysts, elongate vesicles) in the dikes indicate the central intrusions as the source of the radially diking magma. Most dikes consist of segments a few meters to several kilometers long; many segments are *en echelon* but cannot be shown on this small-scale map except some unusually well-expressed ones enclosed by the dashed-line ellipse. An origin for *en echelon* dikes is shown in Figure 9.9. (Redrawn from Smith, 1987.) (b) Theoretical stress analysis. Central intrusion (open circle) is responsible for a *local stress* field that allows for radial diking. The central intrusion perturbed a *regional stress* field that controlled emplacement of the mostly older swarm of subparallel east-northeast-striking dikes mainly of more mafic magma. Trajectory lines are traces (intersections) in the horizontal plane of vertical surfaces parallel to σ_1 and σ_2 . Because these surfaces are perpendicular to σ_3 , they are potential avenues for magma intrusion. Note that most radial dikes are oriented nearly parallel to the regional $\sigma_1 = \sigma_2$ trajectory. (Redrawn from Odé, 1957.)

(Fig. 9.6 in Best and Christensen, 2001)

Campi o sciame filoniani (*dike swarms*)

Imponenti sciame di dicchi sono associati alla risalita di “*plume*” di mantello in zone di estensione della crosta continentale (*margini continentali passivi*) con successiva apertura di un bacino oceanico

- testimonianza della risalita di enormi volumi di magmi basaltici attraverso la litosfera (LIP)

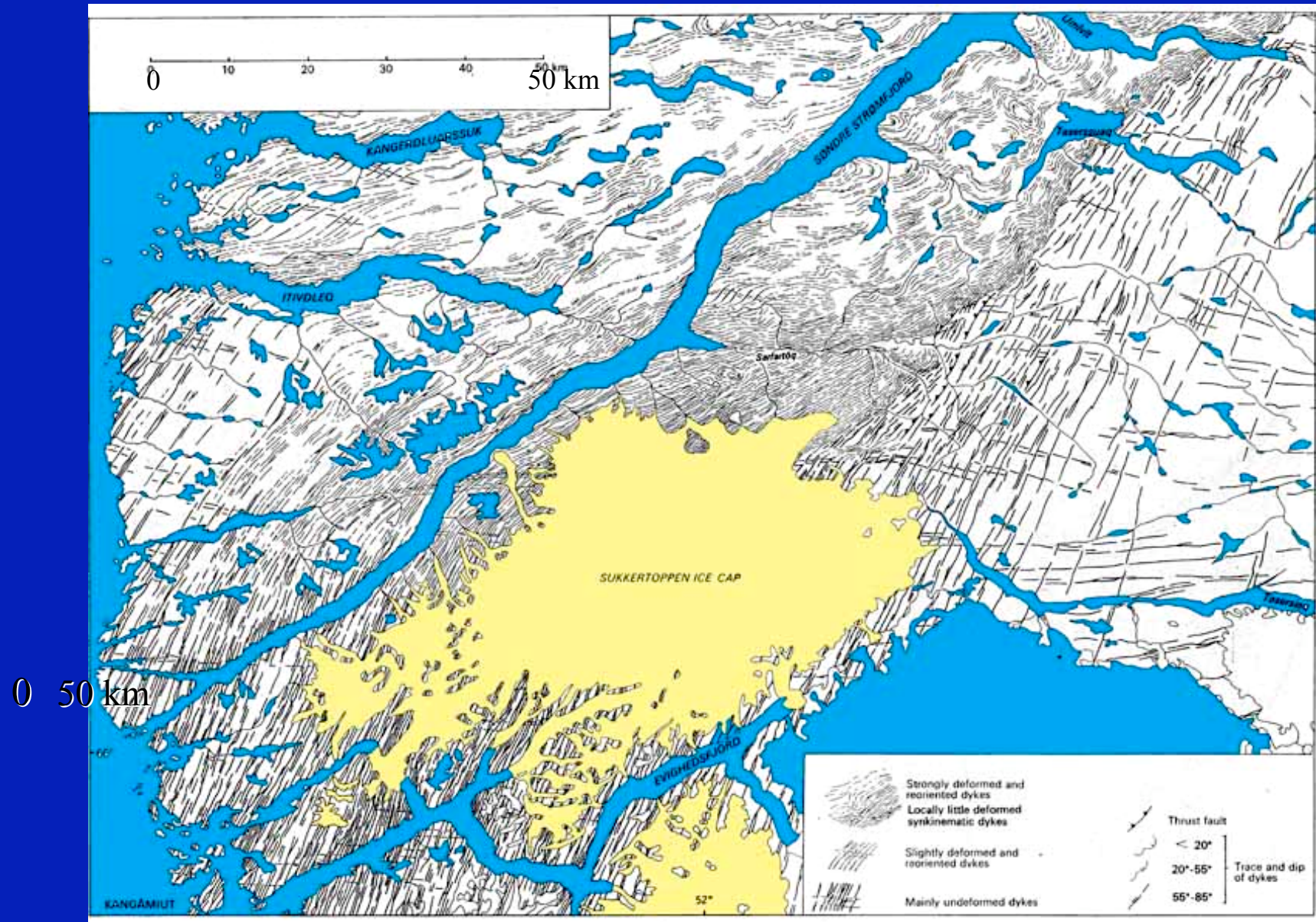
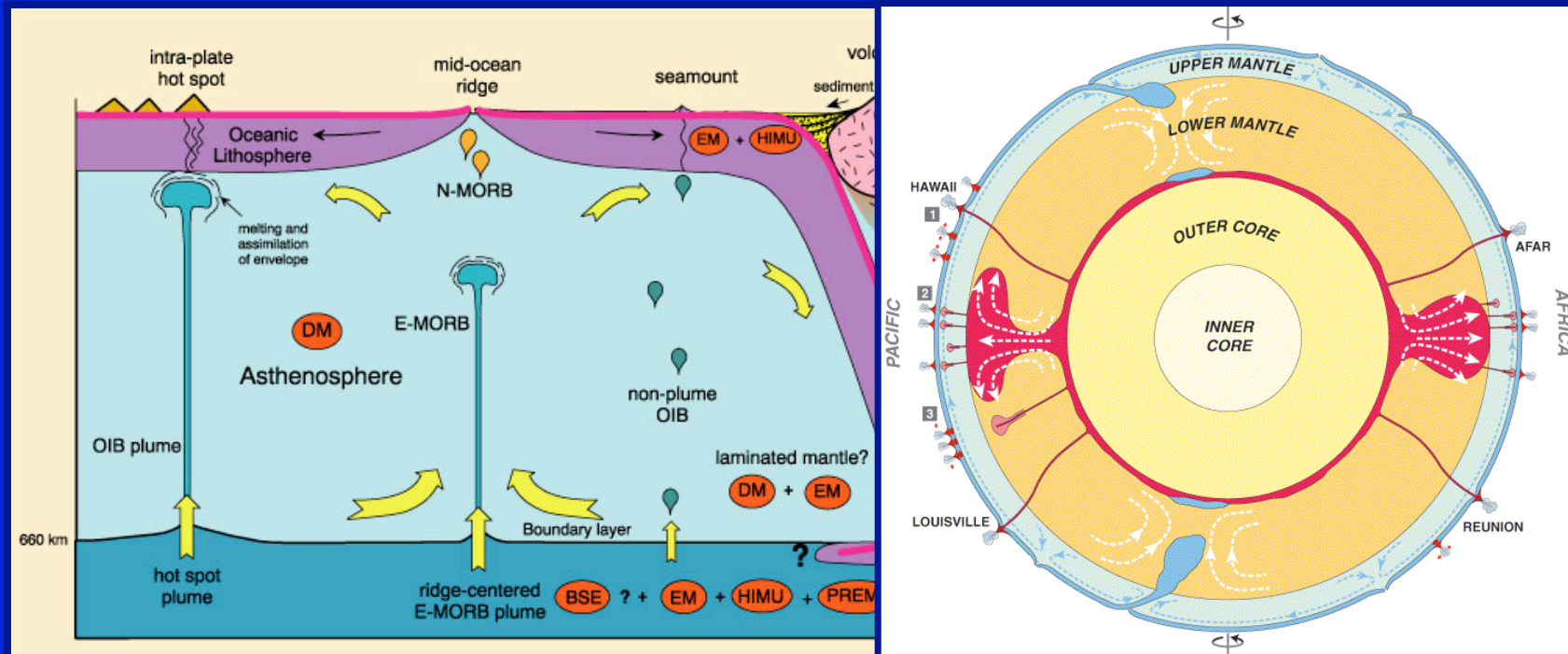


Figure 4-21. Kangâmiut dike swarm in the Søndre Strømfjord region of SE Greenland. From Escher et al. (1976), *Geology of Greenland*, © The Geological Survey of Denmark and Greenland. 77-95 (after Winter, 2001)

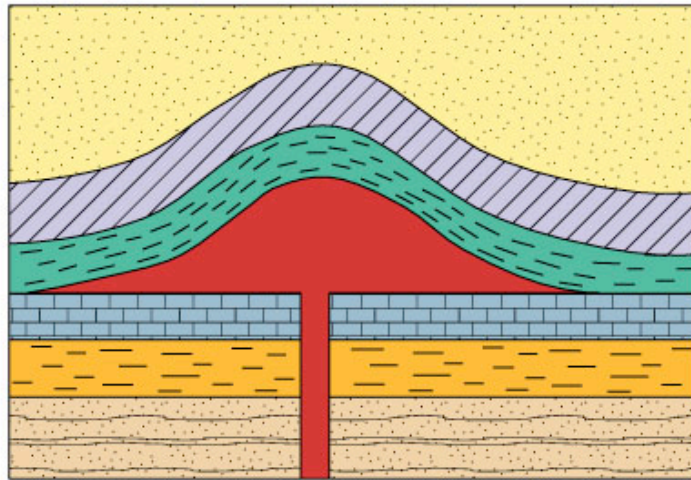
★ Mantle plumes

- ✓ Pennacchi/colonne di materiali di mantello caldi che risalgono per *buoyancy* dal mantello profondo fino alla base della litosfera (*source for OIB and E-MORB*)
- Gli **hot spots** (punti caldi) ne rappresentano la manifestazione superficiale

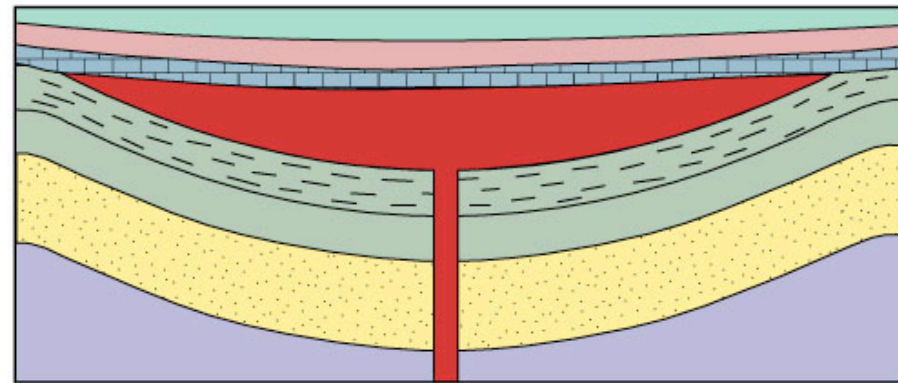


(after Winter, 2001)

★ Intrusioni concordanti: laccoliti e lopoliti



a



b

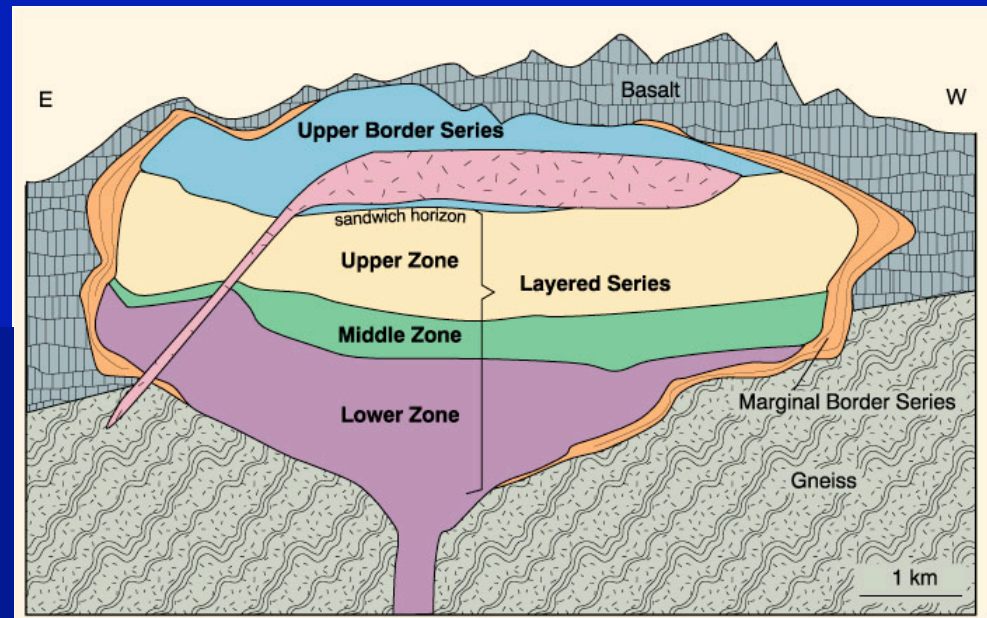
Laccoliti (a): intrusioni superficiali concordanti a forma di “fungo” (diametro di 1-8 km; spessore di ~1000 m). Si formano per incuneamento di magmi viscosi lungo superfici di strato (stadio iniziale di sill). Gli strati superiori vengono sollevati (*doming*) a seguito della risalita di nuovi pulsi di magma producendo una convessità. **Lopoliti** (b) (after Winter, 2001)

★ Intrusioni concordanti: lopoliti

✓ **Lopoliti:** intrusioni *concordanti*, generalmente basiche (*layered mafic intrusions*), a forma di imbuto (*funnel-shaped*)

Intrusione di Skaergaard

(East Greenland). Intrusione di età eocenica connessa con il rifting nord atlantico (after Winter, 2001)



Intrusioni in basamenti metamorfici pre-cambriani o paleozoici, nei margini continentali passivi (contesti estensionali e di rifting)

Layered Mafic Intrusions

Some Principal Layered Mafic Intrusions

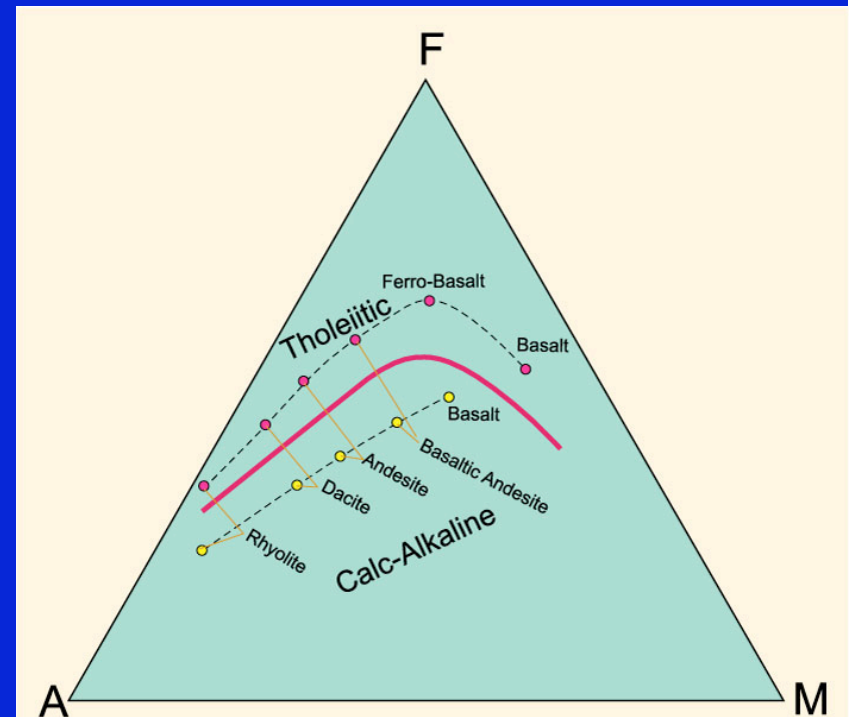
Name	Age	Location	Area (km ²)
Bushveld	Precambrian	S. Africa	66,000
Dufek	Jurassic	Antarctica	50,000
Duluth	Precambrian	Minnesota, USA	4,700
Stillwater	Precambrian	Montana, USA	4,400
Muskox	Precambrian	NW Terr. Canada	3,500
Great Dike	Precambrian	Zimbabwe	3,300
Kiglapait	Precambrian	Labrador	560
Skaergård	Eocene	East Greenland	100

Large or particularly well-studied **LMIs** exposed in continents (many in flood basalt provinces) (after Winter, 2001)

III. Batoliti

- ✓ Corpi intrusivi di grandi dimensioni (area di affioramento $>100 \text{ km}^2$) compositi e zonati che si estendono per centinaia-migliaia di km, costituiti da numerosi plutoni.
- ✓ Stock: corpi intrusivi $< 100 \text{ km}^2$

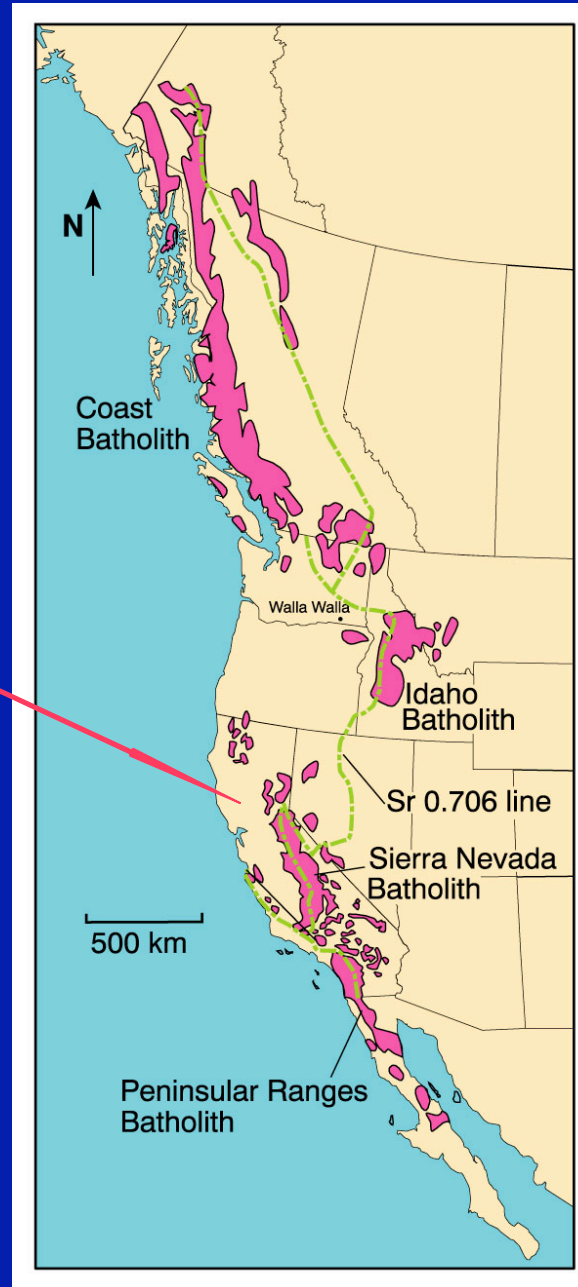
✓ Hanno la loro max espressione in corrispondenza dei margini continentali attivi: *magmatismo orogenico ad affinità calc-alcalina* (after Winter, 2001)



Major plutons of the North American Cordillera
After Anderson (1990) in Winter (2001).

Sierra Nevada Batholith

Corpo composito costituito da centinaia di intrusioni messi in posto tra il tardo triassico e il tardo cretaceo (intervallo di ca. 130 Ma). La composizione varia da gabbriodioriti (ca. 15%) a graniti (35%), con prevalenza di tonaliti-granodioriti (ca. 50%)



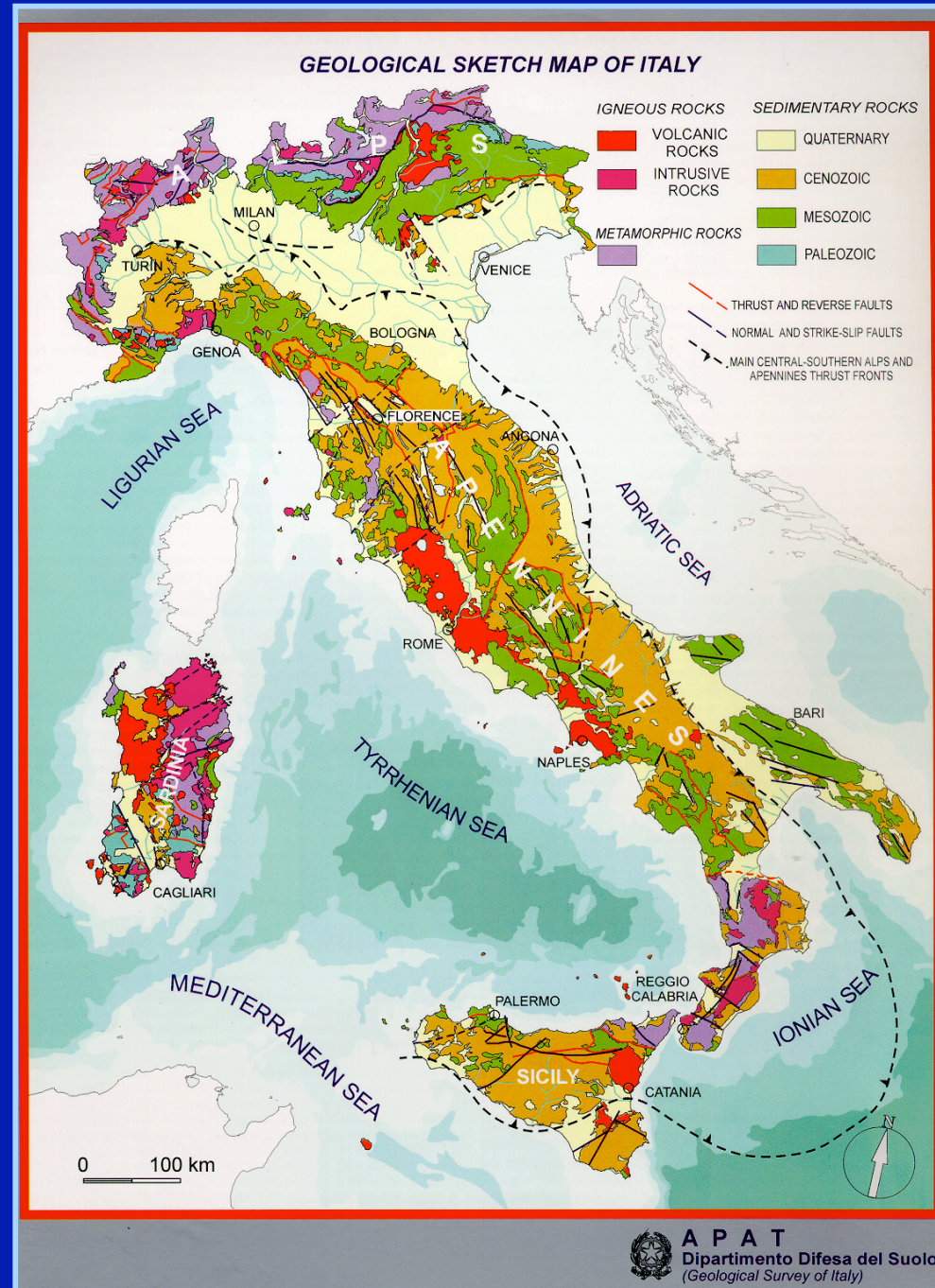
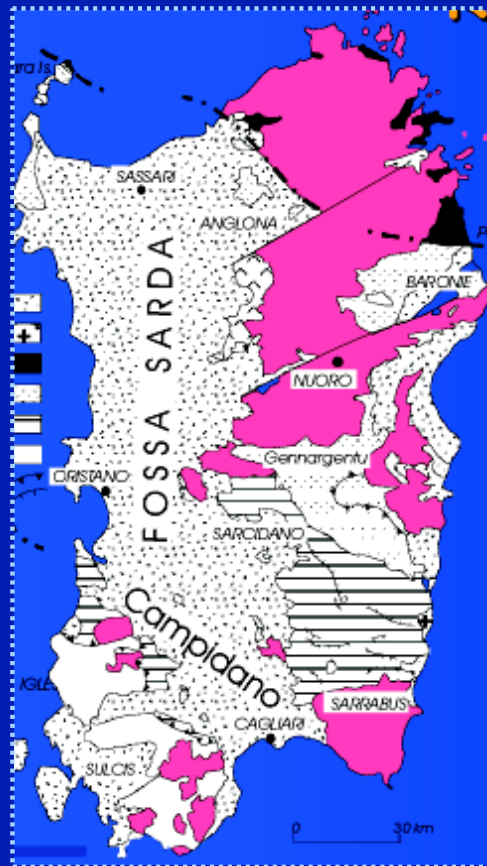
Major plutons of the South American Cordillera

After Anderson (1990, preface to The Nature and Origin of Cordilleran Magmatism. Geol. Soc. Amer. Memoir, 174 and the USGS (in Winter, 2001)

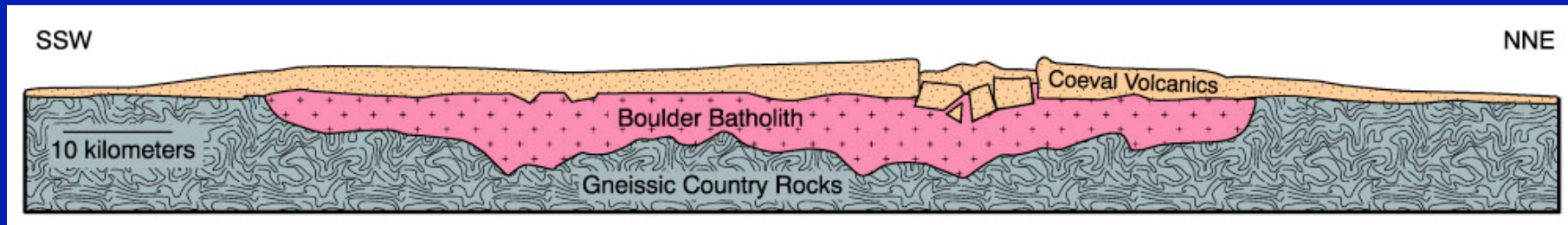
Il Batolite Peruviano della Costa (ca. 1100 x 50 km) è costituito da centinaia di plutoni che si sono messi in posto in un intervallo di ca. 65 Ma (100-35 Ma)



Major plutons of Italy



Dimensioni dei batoliti: estensione laterale vs. spessore



Diagrammatic cross section of the Boulder Batholith, Montana, prior to exposure. After Hamilton and Myers (1967), The nature of batholiths. *USGS Prof. Paper*, 554-C, c1-c30 (after Winter, 2001).

- ❖ Forma tabulare con spessori $\leq 10\text{-}12\text{ km}$ (Petford & Clemens, *Geology Today*, Sept-Oct. 2000).
- ❖ Costruzione dei plutoni attraverso un meccanismo di *coalescenza di puls magmatici distinti* (flussi laminari multipli nel caso di intrusioni tabulari: *flat-floored plutons*)

✓ Zonature compositive dei corpi plutonici

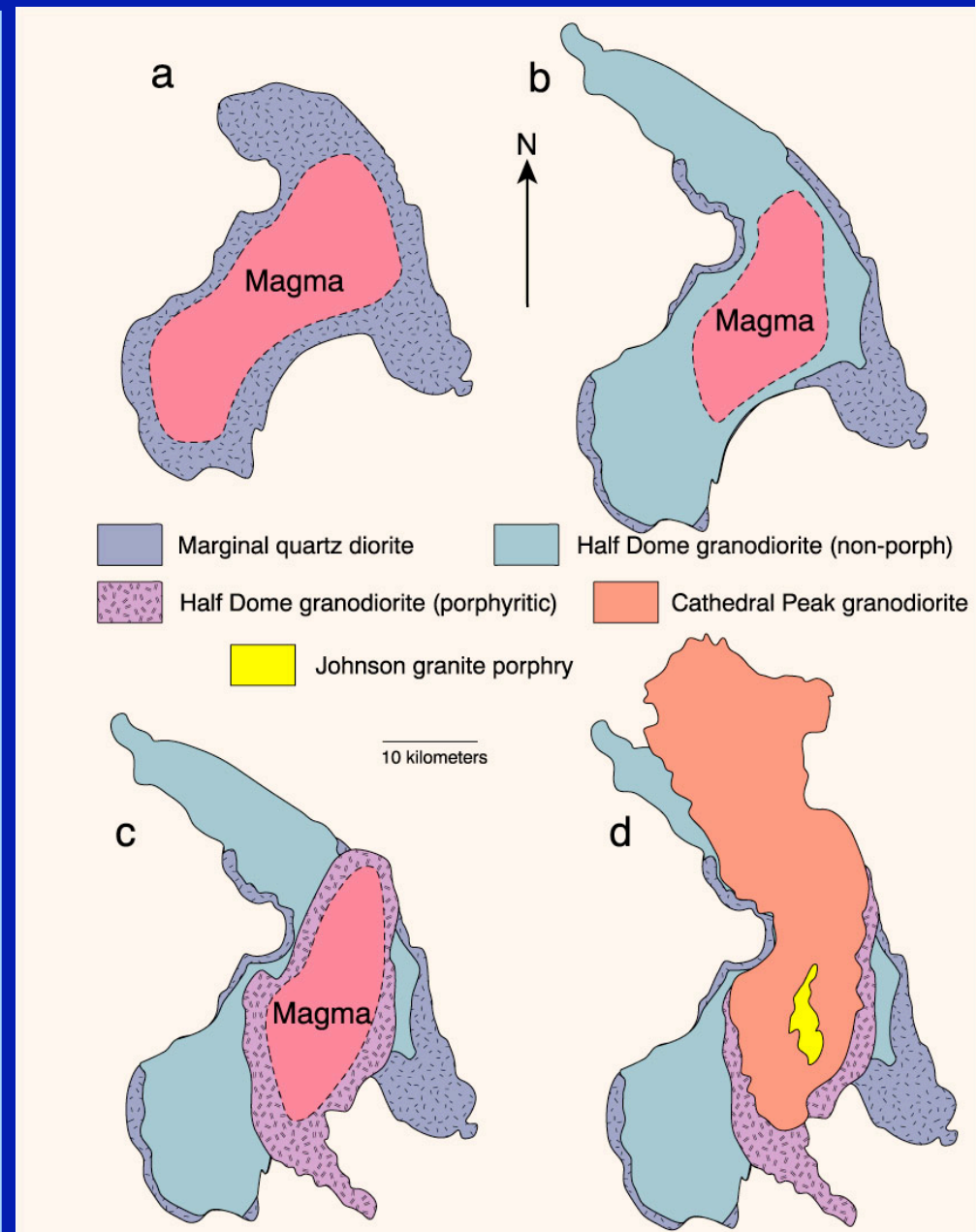
Developmental sequence of intrusions composing the Tuolumne Intrusive Series (after Bateman and Chappell, 1979), *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **90**, 465-482. (after Winter, 2001)

a. Original intrusion and solidification of marginal *quartz diorite*.

b. Surge of magma followed by solidification of *Half Dome Granodiorite*.

c. Second surge of magma followed by solidification of *porphyritic facies* of Half Dome Granodiorite.

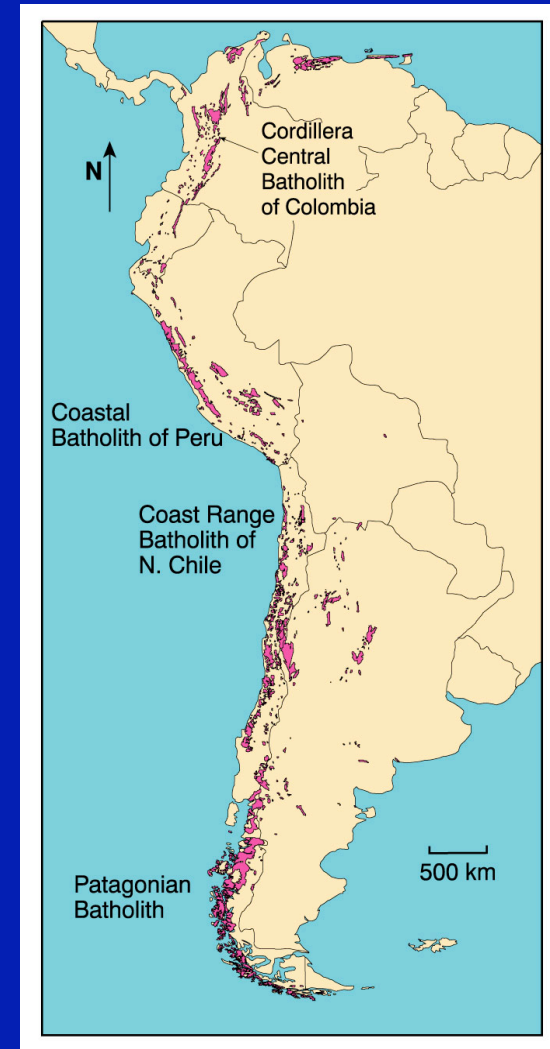
d. Third surge of magma followed by solidification of *Cathedral Peak Granodiorite* and final emplacement of *Johnson Granite Porphyry* (see Appendix)



✓ Tempi di messa in posto dei corpi intrusivi

❖ Grandi complessi batolitici: decine-centinaia-migliaia di *pulsi intrusivi distinti* che si sono messi in posto in un *arco di tempo variabile* da pochi a decine di Ma.

➤ plutonismo come *processo discontinuo, episodico* legato al *contesto geotettonico* (Pitcher, 1993; in Winter, 2001)



Batoliti del margine Pacifico del Sud America. (Cordilleran Batholiths)

Tempi di solidificazione dei corpi intrusivi

- ✓ Il tempo di solidificazione (tempo necessario per raggiungere la $T_{solidus}$) di un *corpo intrusivo* dipende da diversi fattori
 - ❖ *profondità di intrusione*
 - ❖ *volume*
 - ❖ *chimismo*
 - ❖ *modalità di trasferimento del calore*
(conduzione vs. convezione)

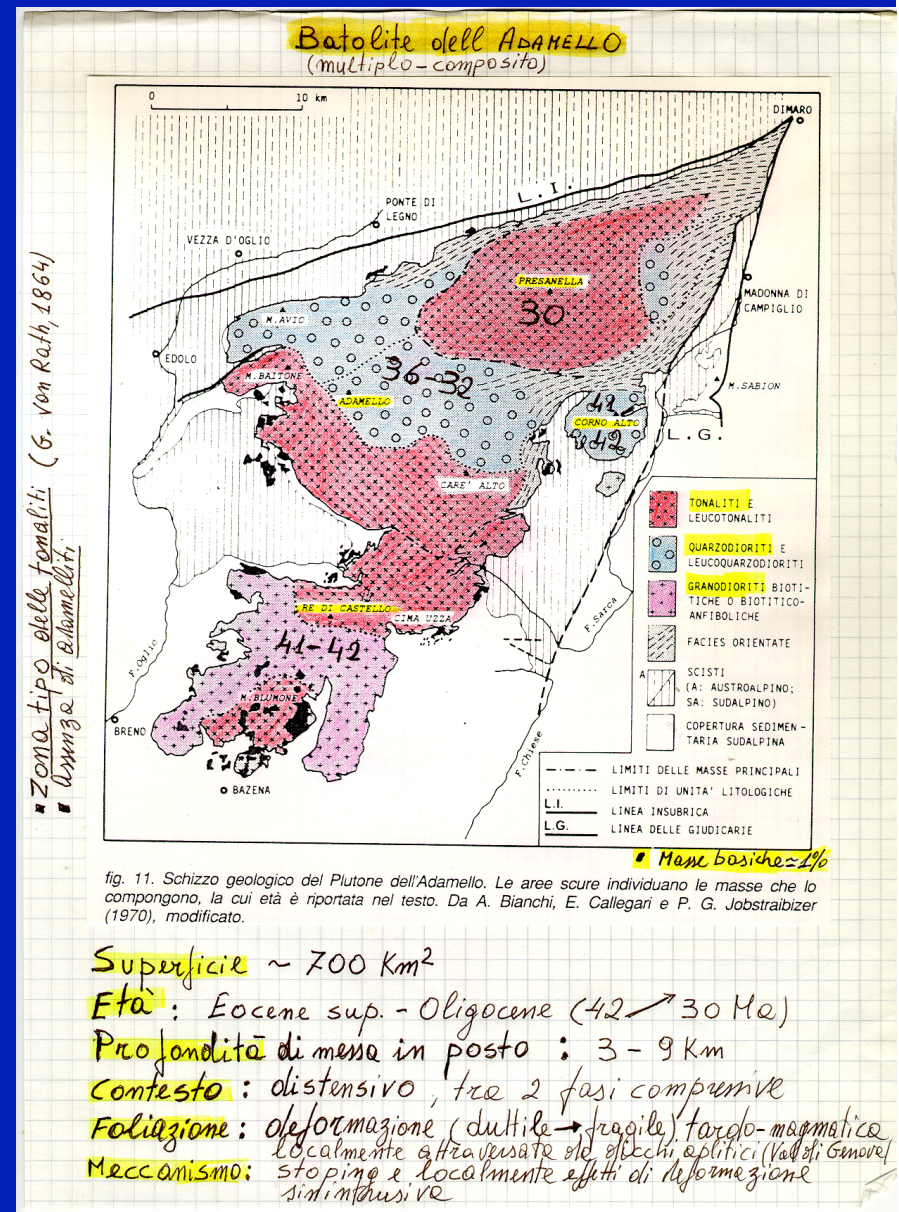
✓ I tempi di solidificazione sono dell'ordine di *decine di migliaia di anni* ($R=1$ km) e del *milione di anni* per corpi maggiori ($R=10$ km) (v. Spera, 1980)

Batolite terziario dell'Adamello

(Alpi Meridionali)

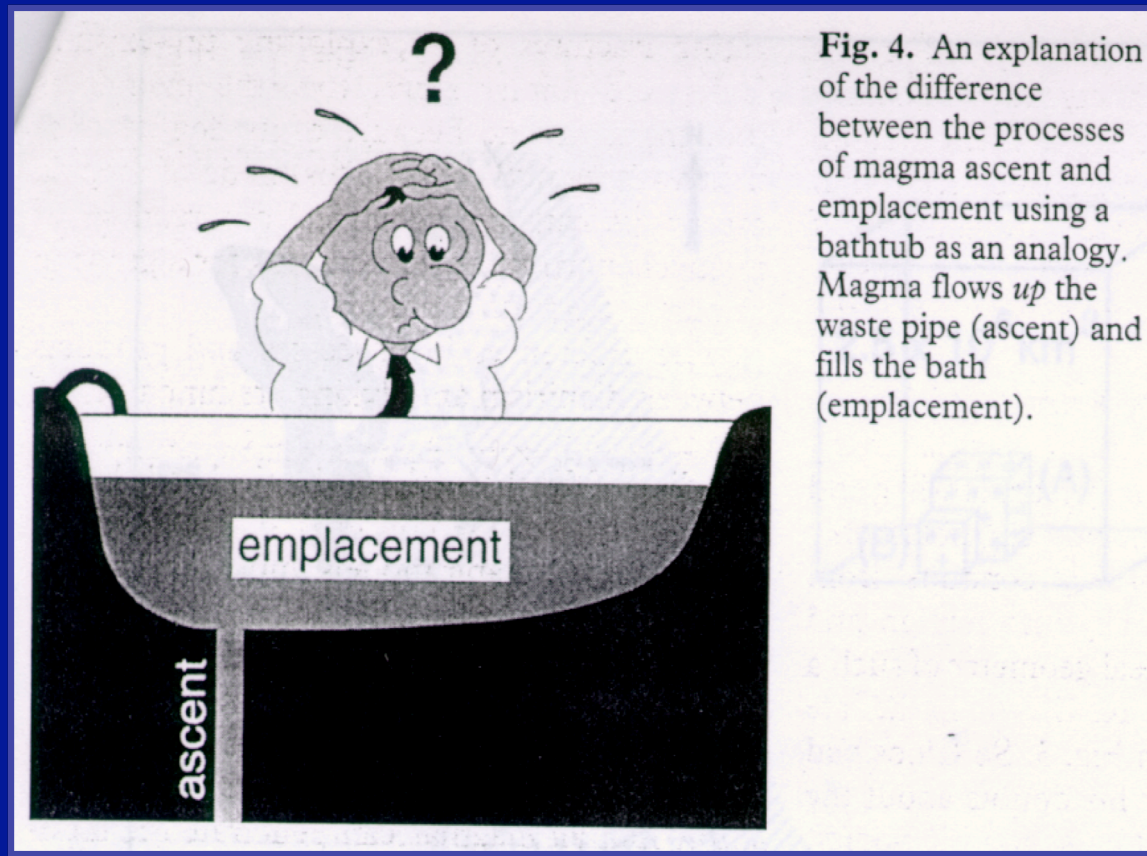
- età
 - profondità di intrusione
 - natura composita (12 plutoni)
 - tempi e modalità di messa in posto (42- 30 Ma)
- (Del Moro et al. (1983); Mem. Soc. Geol. It., 26, 285-299)

- Profondità di messa in posto: 5-8 km
- Contesto: regime transtensivo (linea del Tonale: trascorrente destra)
- Foliazione: deformazione tardo-magmatica (duttile-fragile)



IV Meccanismi di risalita e messa in posto dei magmi

✓ Risalita (*ascent*) vs. messa in posto (*emplacement*)



Petford & Clemens (2000): *Geology Today*, Sept-Oct 2000/181

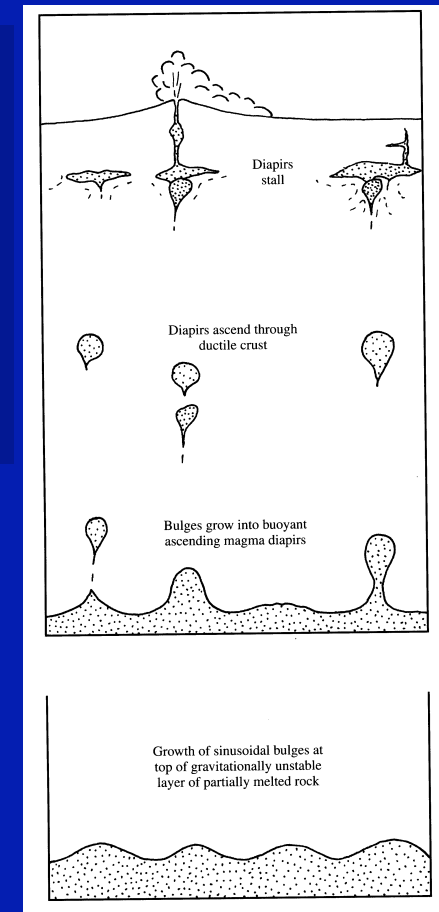
✓ Meccanismi di risalita dei magmi

- risalita diapirica
- risalita lungo fratture (*dike propagation model*)

diapiro/plume: termini generici utilizzati per indicare corpi (rocce, magmi) che risalgono per “*buoyancy*”

zona sorgente

*situazione di instabilità gravitazionale
(Rayleigh-Taylor instabilities)*



➤ Diagramma schematico che mostra la **formazione ed evoluzione** di un *diapiro/plume magmatico* dalla *zona sorgente* (mantello o crosta inferiore) alla *zona di messa in posto* (Fig. 9.15, after Best 2003)

- ✓ Le modalità di risalita e i meccanismi di intrusione dei magmi dipendono principalmente dalle loro proprietà fisiche (*densità* e *viscosità*) e da quelle delle rocce incassanti
- ✓ Ad elevate profondità -*contesto duttile*- molti magmi risalgono sotto forma di diapiri

- ✓ La *velocità di risalita* di un **diapiro** (corpo magmatico sferico di raggio r) è espressa, approssimativamente, dalla legge di Stokes

$$V = 2r^2 g \Delta\rho / 9\eta$$

$\Delta\rho$ = contrasto di densità; η = viscosità del mezzo

- ✓ Il parametro critico in questa relazione è la *viscosità delle rocce incassanti*. I valori elevati di η nelle rocce crostali comportano *velocità di risalita* di ca. 0.1 - 50 m/y con tempi di risalita di ca. 10^4 - 10^5 y (cf. Table 9.1 in Best 2003)

- ✓ Le *velocità di risalita* stimate per magmi basaltici - 0.1 ms^{-1} (alkali basalti) - $10/20 \text{ ms}^{-1}$ (kimberliti) - *non sono compatibili* con modelli di percolazione in un mezzo granulare poroso o di risalita diapirica
- ✓ Il meccanismo di risalita ritenuto più probabile è la *propagazione lungo fratture* create dal magma stesso ($P_{\text{magma}} > P_{\text{litostatica}}$) o da stress locali nella litosfera

✓ Il modello *diapirico* viene ritenuto *poco probabile* anche per la risalita dei *magmi granitici* nella crosta, a causa di:

i) assenza di evidenze strutturali a favore

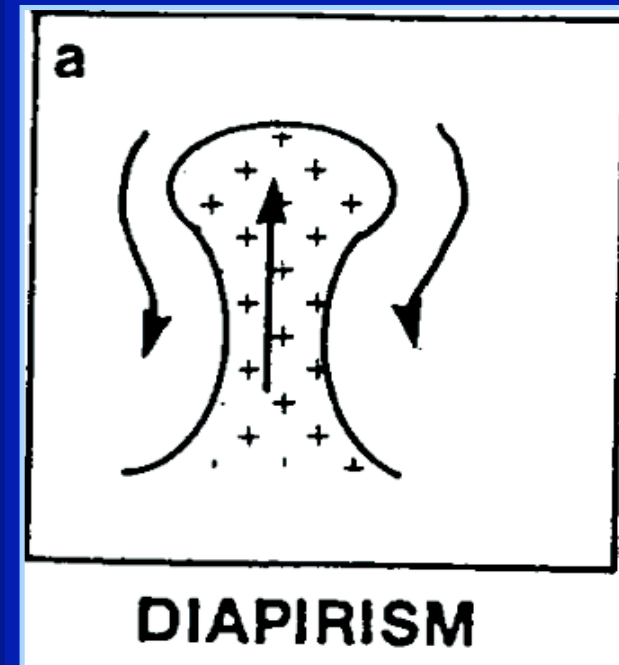
ii) lentezza della risalita diapirica

(ca. 10^6 anni vs. 10^2 - 10^4 anni nel modello di risalita lungo fratture) (Clemens & Mawer, 1992; Petford et al. 1993)

V. Meccanismi di intrusione e messa in posto

✓ Diapirismo

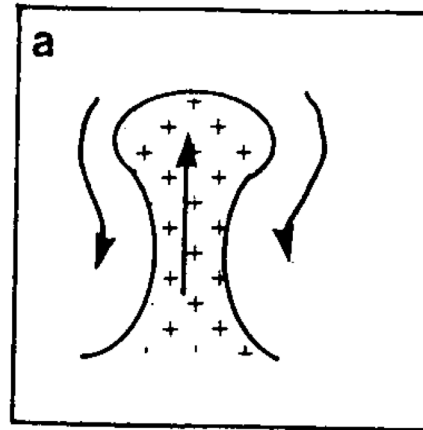
- Nella risalita diapirica le rocce incassanti vengono deformate e spinte lateralmente, per poi ricongiungersi al di sotto del corpo plutonico
- Attualmente si ritiene che il diapirismo come *meccanismo di risalita e messa in posto* debba essere confinato alla *crosta intermedio-profonda duttile*



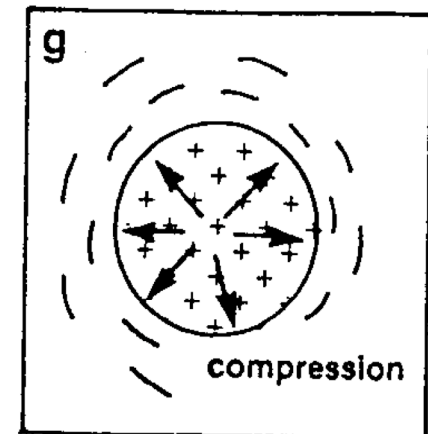
✓ Ballooning

Spesso confuso con il diapirismo, è in realtà un *meccanismo di messa in posto*. Consiste nell'*espansione in situ* di un corpo magmatico ai livelli di messa in posto dovuta alla risalita di pulsi tardivi di magma che spingono radialmente la parte già cristallizzata

- sviluppo di una *foliazione concentrica* nel plutone
- *appiattimento* delle enclaves ai margini del plutone



DIAPIRISM

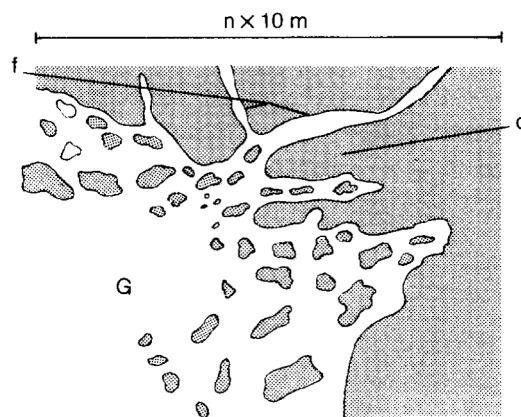


BALLOONING

✓ Stopping

- ❖ Rimozione lungo fratture/discontinuità di blocchi di rocce incassanti attraverso l'incuneamento del magma.
- ❖ *Fenomeno locale* riscontrabile intorno alla maggior parte dei plutoni (aree di bordo o di tetto piene di septa/xenoliti)
- ❖ Non viene ritenuto un meccanismo importante per la creazione di spazio: i blocchi rimossi si comportano come *pozzi di calore* causando la cristallizzazione prematura del magma

Fig. 3.26 - Schema di un dettaglio di contatto plutonico che si sviluppa un fenomeno di stopping entro il granito G e che produce infiltrazioni filoniane (f) nelle rocce cornubianitiche (c, v. § 15.1) incassanti.



D'Amico et al., 1987

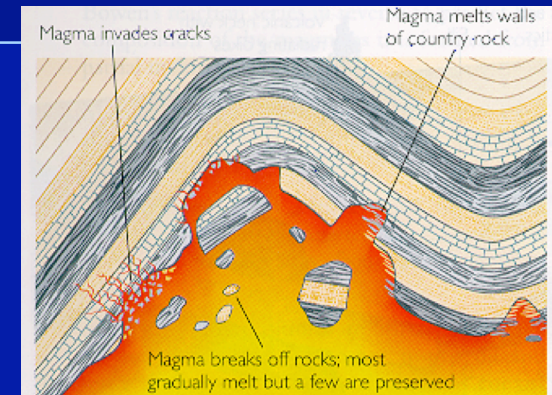


FIGURE 4.17 Magmas make their way into country rock in three basic ways: by invading cracks and wedging open overlying rock, by breaking off rock, and by melting surrounding rock. Here we see a magma intruding an area of surrounding folded rock.

Press & Siever, 1997

✓ Subsidenza per collasso (*cauldron subsidence*)

- Avviene a livelli superficiali, generalmente in prossimità di grandi faglie

Comporta lo *sprofondamento di blocchi* (km^3) di rocce di tetto delimitati da fratture/faglie lungo le quali il *magma si insinua formando filoni lineari o anulari*, isolando i blocchi che affondano lasciando lo spazio per la risalita e messa in posto del magma (Fig. 4.41 in Philpotts, 1990)

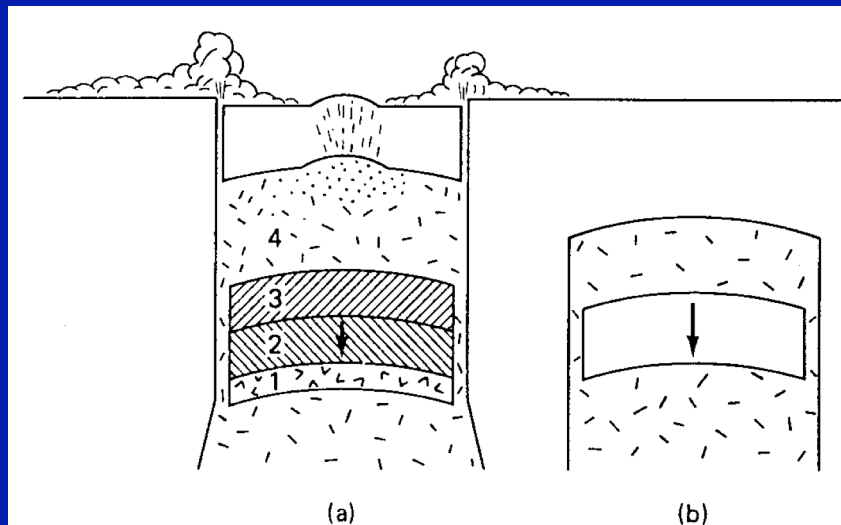
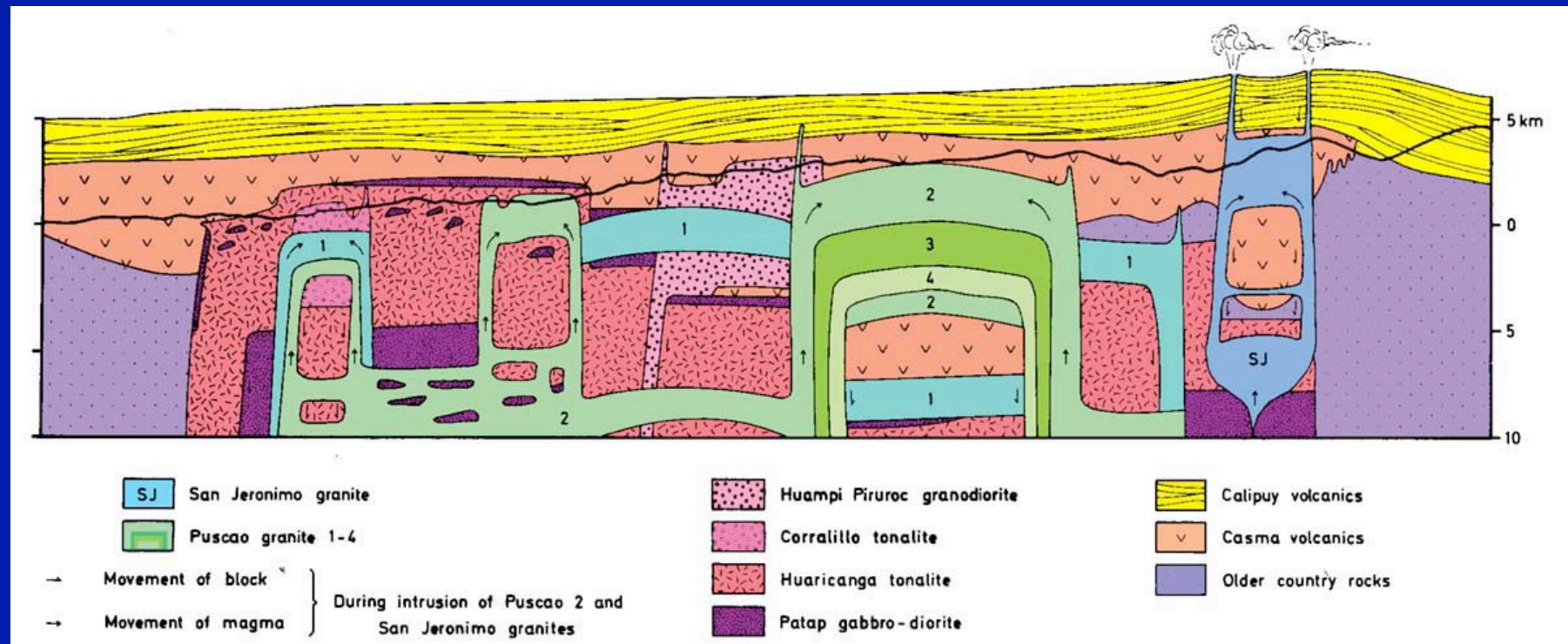


FIGURE 4-41 Development of a stock by the sinking of the roof rocks along a ring fracture up which magma rises as the block descends. On the surface, a stock may have an associated caldera (a), but it need not break through to the surface at all (b).

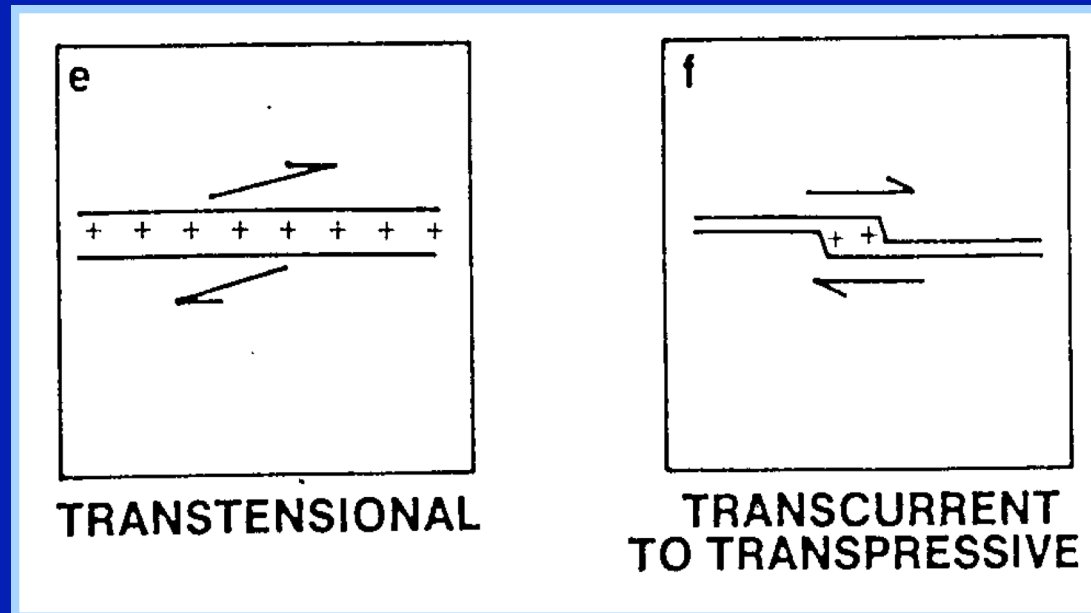
✓ Esempio di messa in posto di plutoni granitoidi per *subsidenza per collasso* nel Batolite della Costa (Perù)



Schematic cross section of the Coastal Batholith of Peru (after Winter, 2001)

✓ Messa in posto lungo *shear zones*

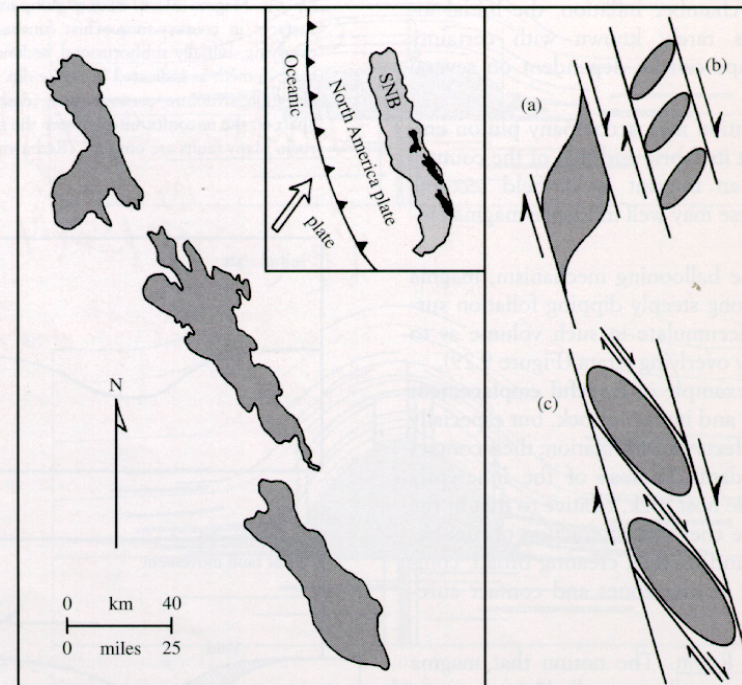
➤ Formazione di corpi plutonici *sintettonici allungati*, con strutture // alla direzione di max allungamento e *concordanti* con quelle delle rocce adiacenti



Esempio: Great tonalite sill, Alaska-British Columbia, Corpo di 1000x20km messosi in posto lungo una shear zone tra due *superterrane* (Ingram & Hutton, 1994)

Controllo tettonico nella messa in posto dei plutoni del batolite della Sierra Nevada

Formazione di *shear zones* lunghe decine-centinaia di km, con i plutoni che si mettono in posto nei *domini tensionali tra shear zones adiacenti*.
(After Best, 2003)



9.31 Possible tectonic control on making room for plutons within the Sierra Nevada batholith. Map on the left shows three composite plutons (shaded) comprising the Cathedral Range intrusive sequence emplaced at 92–81 Ma. Smaller-scale map in upper middle of figure shows position of the three intrusive masses (black) within the larger Sierra Nevada batholith (SNB; Figure 9.16), which was created during mostly oblique convergence (arrow) of oceanic plates beneath the North American continental plate during the Mesozoic. Panel on right shows three possible ways (a, b, c) in which local extensional domains (shaded ellipses) might be created in the right-lateral strike-slip regime in the continental plate during oblique plate convergence; these extensional domains could create room for magma emplacement. (c) Extensional regions bridging between secondary right-lateral shear zones seem to correspond most closely in shape and orientation with the Sierra intrusive masses. (Redrawn from Tikoff and Teyssier, 1992.)

VI. "Timing" delle intrusioni vs. contesto tettonico regionale

- Intrusioni anorogeniche
- Intrusioni orogeniche (contesti subduttivi e collisionali)
- ✓ Occorre stabilire la *cronologia relativa* tra *messa in posto del plutone* vs. *tettonica regionale* sulla base delle *caratteristiche strutturali* (fabric) e delle "*field relations*"

✓ Intrusioni sintettoniche/sincinematiche

■ Presenza di *deformazioni* che vanno dallo stato magmatico allo stato solido di alta T senza soluzione di continuità

La deformazione magmatica avviene in presenza di una quantità di fuso $> \text{RCMP}$

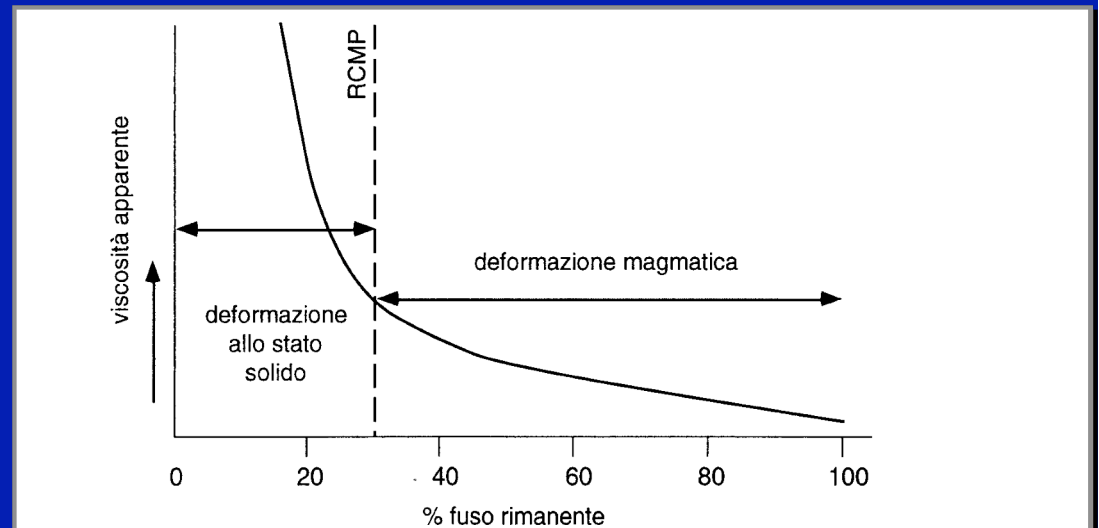
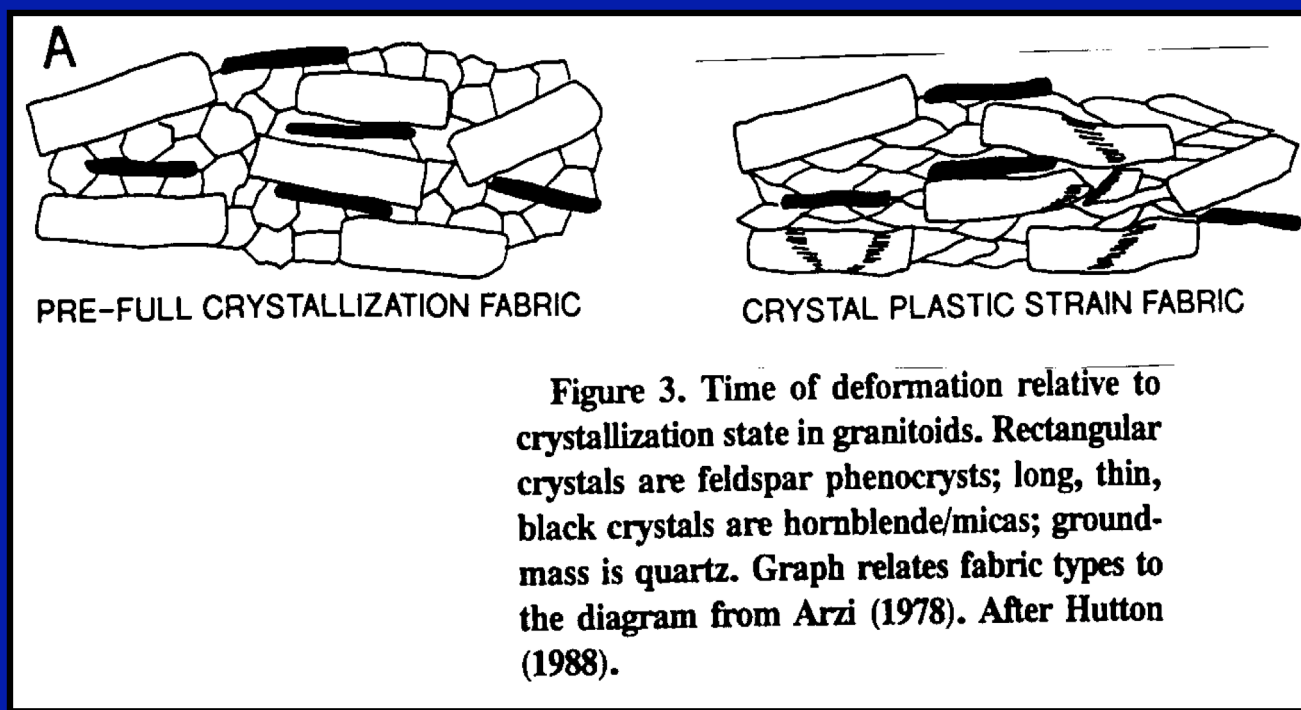


Fig. 5.3 da Di Battista 1992, PhD Thesis, Università di Bari. Paterson et al. 1989: J Struct Geol 11, 349-363)

Fig. 5.3 - Diagramma di Arzi (1978) che mette in relazione la percentuale di fuso residuo rispetto alla viscosità apparente del sistema fuso-cristalli. Dalla curva ricostruita si evince che esiste una percentuale critica di fuso residuo (RCMP = reological critical melt percentage), pari a circa 30%, oltre la quale si ha un repentino aumento della viscosità apparente al diminuire della percentuale di fuso. L'RCMP viene assunto come limite per il passaggio dalla deformazione magmatica alla deformazione allo stato solido.

✓ Intrusioni sintettoniche/sincinematiche

- // tra *foliazione magmatica* e *foliazione allo stato solido*.
- La deformazione allo stato solido impartisce alle plutoniti un “*aspetto gneissico*”



(da Di Battista, 1992)

✓ Fabric anisotropy in granitoids emplaced at different crustal levels: an example from the Sila and the Serre Massifs, Calabria

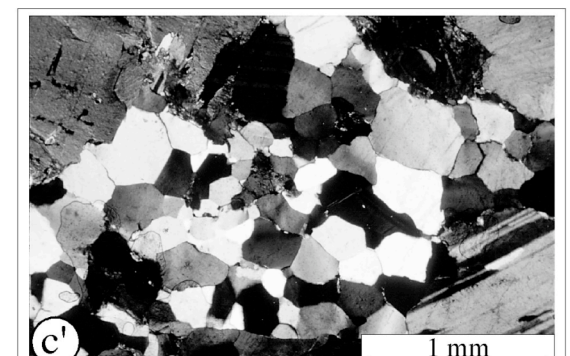
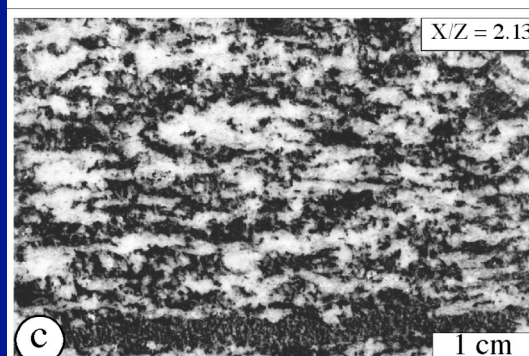
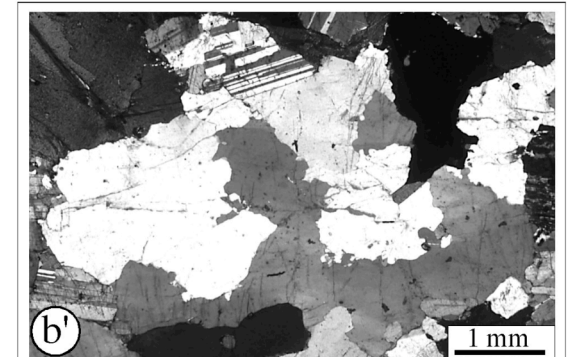
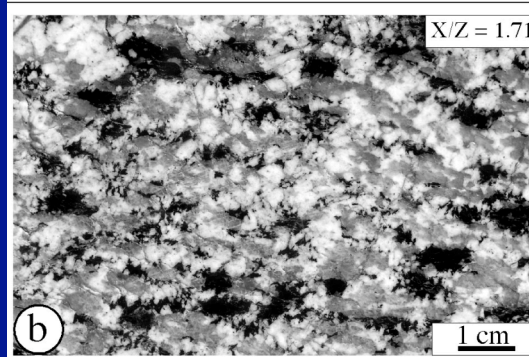
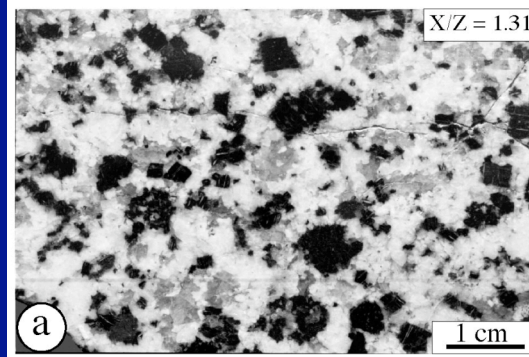
Fabric and microstructures in granitoids emplaced at different depths.

aa': magmatic fabric in shallow granodiorite (about 6 km)

cc': strong fabrics explained by solid-state strain overprint in deep-seated tonalites (about 23 km)

c': foam texture in quartz resulting from high T *polygonization after dynamic recrystallization*

(after Caggianelli et al., 2000. Terra Nova, 12, 109-116)



✓ Intrusioni post-tettoniche

❖ Intrusioni nettamente discordanti rispetto alle anisotropie delle rocce adiacenti

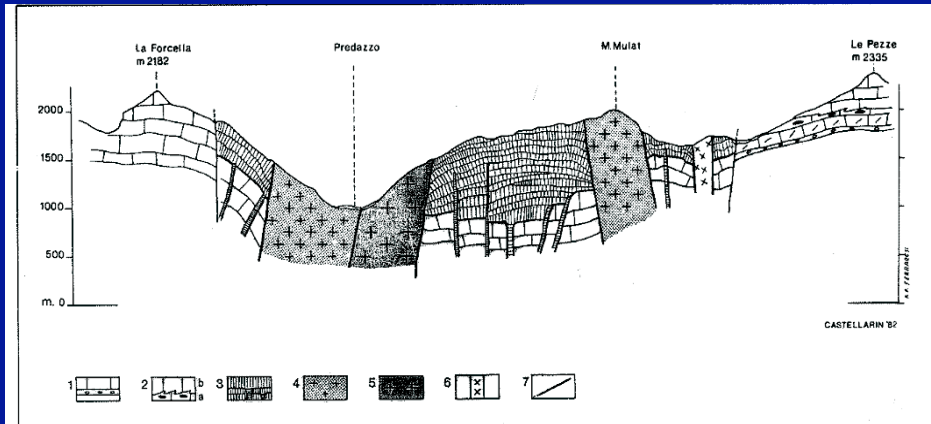
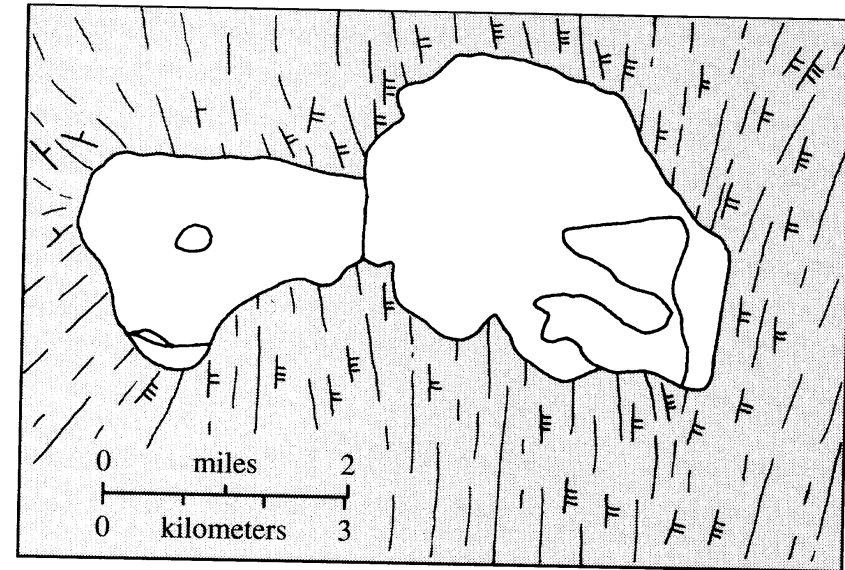


Fig. 2. Sezione attraverso le intrusioni anulari di Predazzo. Spiegazione della legenda: 1. Unità anisiche; 2. Formazione di Buchenstein (a) e Calcarei e dolomie (Calcare del Latemar) (b) (Ladinico); 3. Colate basaltiche, corpi subvulcanici, corpi filoniani (Ladinico sup.); 4. Intrusioni "monzonitiche"; 5. Intrusioni "granitiche"; 6. "Sieniti"; 7. Contatto intrusivo.



Foliation dip angle \backslash 15°-35° $/$ 45°-65° \equiv 70°-80°

9.22 **Posttectonic plutons** with highly **discordant**, sharp contacts against their foliated metamorphic host rock at Mount Ascutney, Vermont. Note the lack of deflection of the foliation in the country rock (shaded) adjacent to the six Cretaceous intrusions, as if a gigantic cookie-cutter had removed metamorphic rock and allowed magma to move into its place. Compare with the concordant plutons in Figures 9.19 and 9.28 emplaced in large part by forceful pushing aside of ductile wall rock. (Redrawn from Daly, 1968.)

Intrusioni anulari di Predazzo (Castellarin et al., 1982)

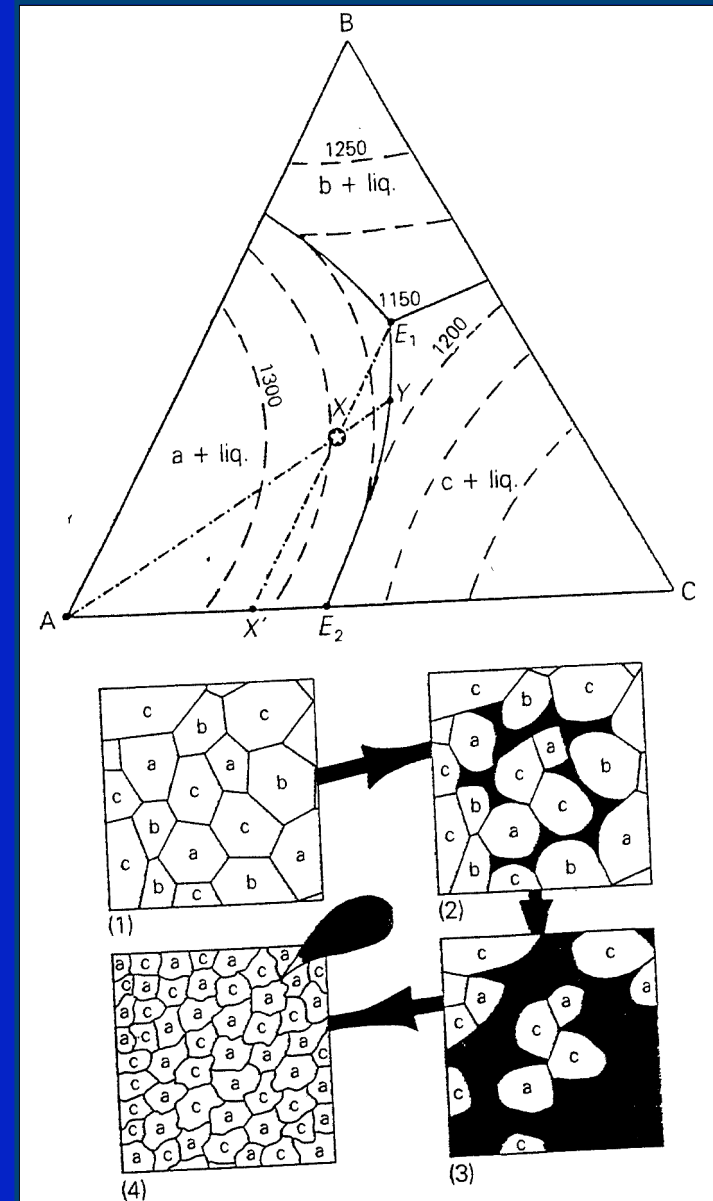
(Best, 2003)

APPENDIX

✓ Fusione parziale: localizzazione del fuso

● Fusione parziale in un sistema ternario modello A-B-C

1. $T < T_{E1}$: associazione subsolidus (a, b, c,) di composizione X
2. T_{E1} : fusione parziale con formazione di un fuso (in nero) di **Xeutettica**
3. grado più avanzato di fusione parziale
4. il fuso si segrega lasciando un residuo solido (a, c) di composizione X' (after Barker 1983, in Wilson 1989)



*Progressive compaction of a partial molten layer**

Fattore critico è la forza di galleggiamento (*buoyancy*)

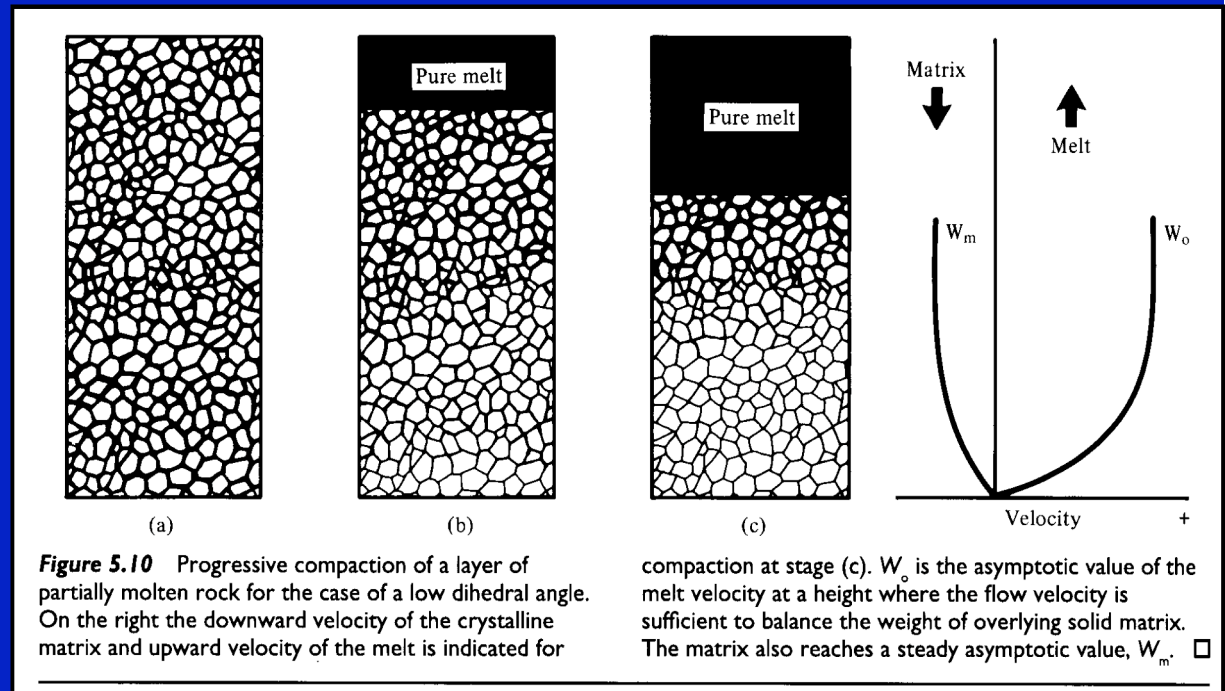
La *velocità relativa del fuso vs. matrice* è:

- $\Delta V = k\phi / \eta_l * \Delta\rho g$ (Legge di Darcy)

$k\phi$ = permeabilità; η_l = viscosità; $\Delta\rho g$ = forza di galleggiamento

La segregazione del fuso da un “crystal mush” è regolata dalla *reologia* della sospensione e dalla risultante tra la *forza di galleggiamento* e le *forze viscosi*, che sono inversamente proporzionali alla permeabilità e direttamente proporzionali alla viscosità del fuso:

$$\Delta V = 1-10 \text{ m a}^{-1}$$



*Sparks (1992)

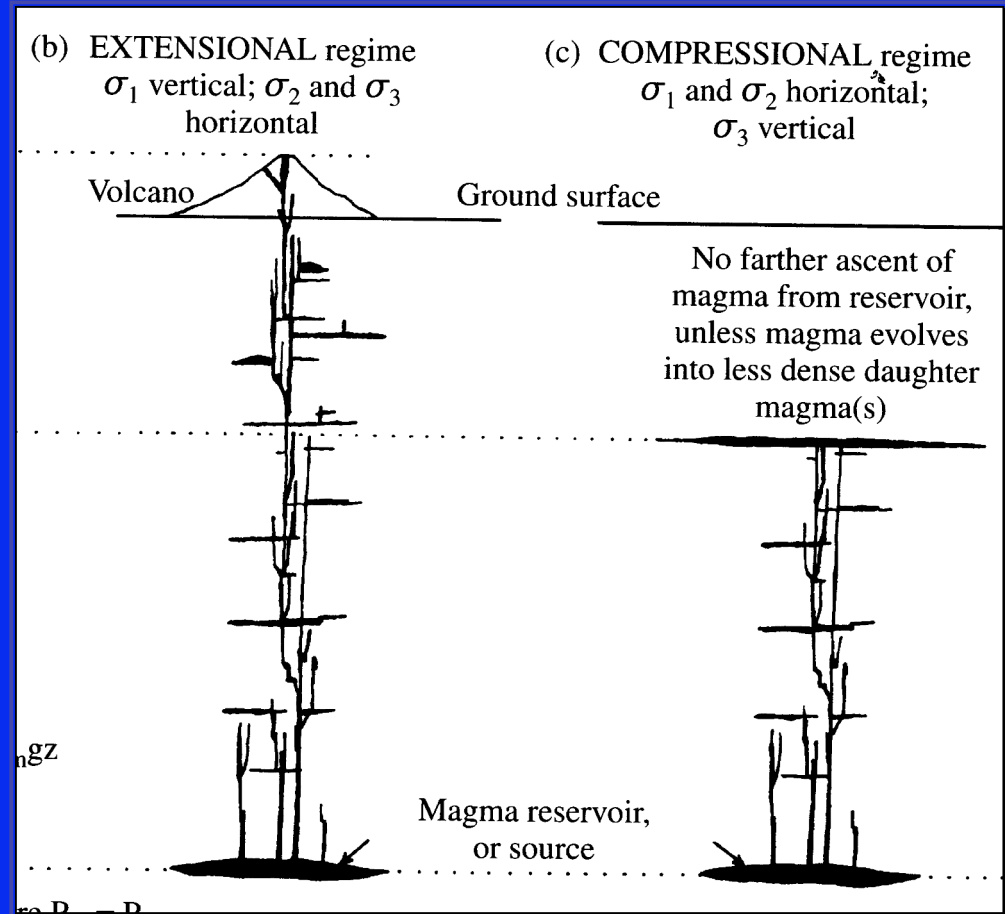
✓ Lo stato di stress della litosfera controlla la capacità di risalita dei magmi

• Contesto estensionale (b)

stress orizzontale minimo $\sigma_3 < P_m$: la sovrappressione del magma è in grado di dare origine a fratture (*fratturazione idraulica*) lungo le quali il magma può risalire

• Regime compressivo (c)

stress orizzontale minimo $\sigma_2 > P_m$: la risalita del magma è di fatto *impedita*. Il magma si può espandere lateralmente sotto forma di sill. Il magma può evolvere per FC dando origine a differenziati che possono risalire



Best (2003)

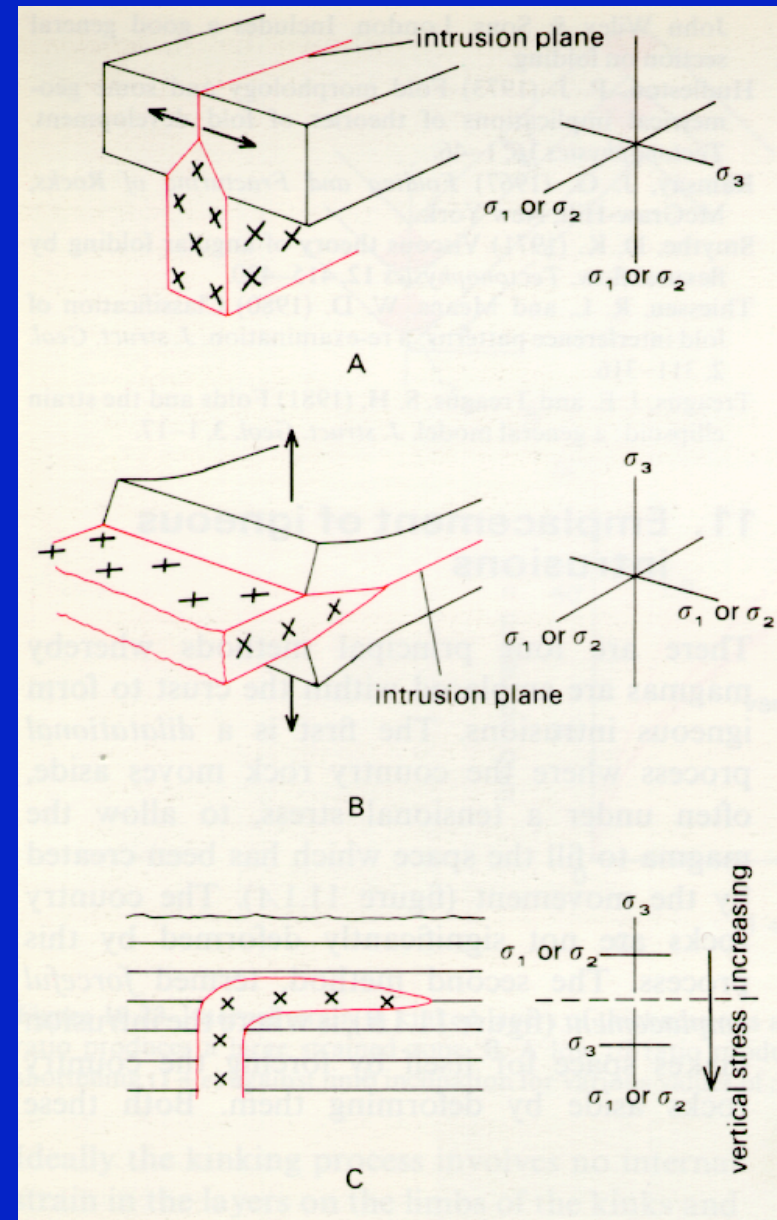
✓ *Dicchi vs. Sill*

Lo stato di stress condiziona la messa in posto di dicchi e sill. In un mezzo omogeneo il piano di intrusione corrisponde a $\sigma_1 \sigma_2$ ed è perpendicolare a σ_3

A. Dicco: piano di intrusione perpendicolare a σ_3

B. Sill: σ_3 quasi verticale

C. Dicco-Sill: livello in corrispondenza del quale si passa da σ_1 o σ_2 verticale, a σ_3 verticale (Park, 1982)



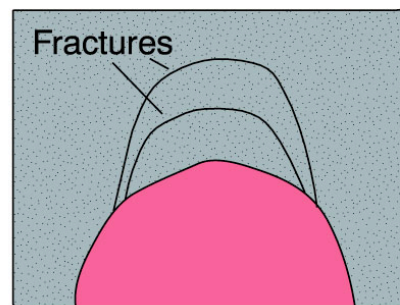
● Dicchi ad anello (*ring dikes*) e dicchi a cono (*cone sheets*)

✓ **Ring dikes:** *intrusioni arcuate* subverticali che in qualche caso possono formare una *struttura circolare completa* (Figs. 4.23, 4.24 in Winter 2001). Si formano sotto la spinta di un corpo plutonico in risalita ($P_{\text{magma}} < P_{\text{lith}}$) o come effetto di un collasso calderico (*cauldron subsidence*)

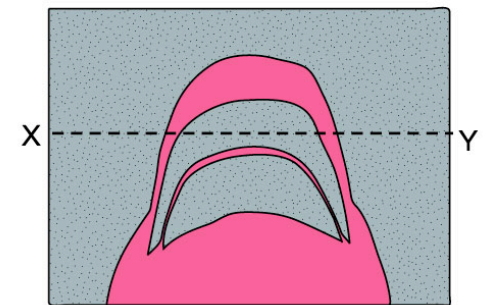
✓ **Cone sheets:** Al di sopra di un corpo plutonico in risalita, con $P_{\text{magma}} > P_{\text{lith}}$, si formano delle fratture coniche concentriche // a σ_1 e σ_2 e perpendicolari a σ_3

Il magma risale invadendo le fratture concentriche ad *andamento conico* (v. Fig. 9.10 in Best, 2003)

Cross -sections of Ring Dike

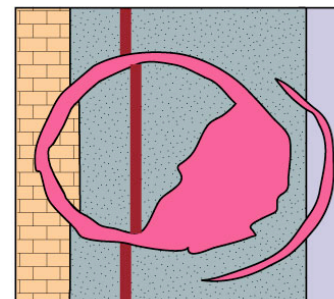


a



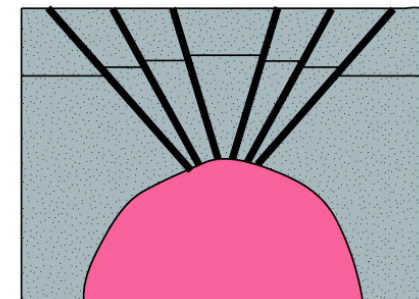
b

Map View of Ring Dike



c

Cone Sheet



d

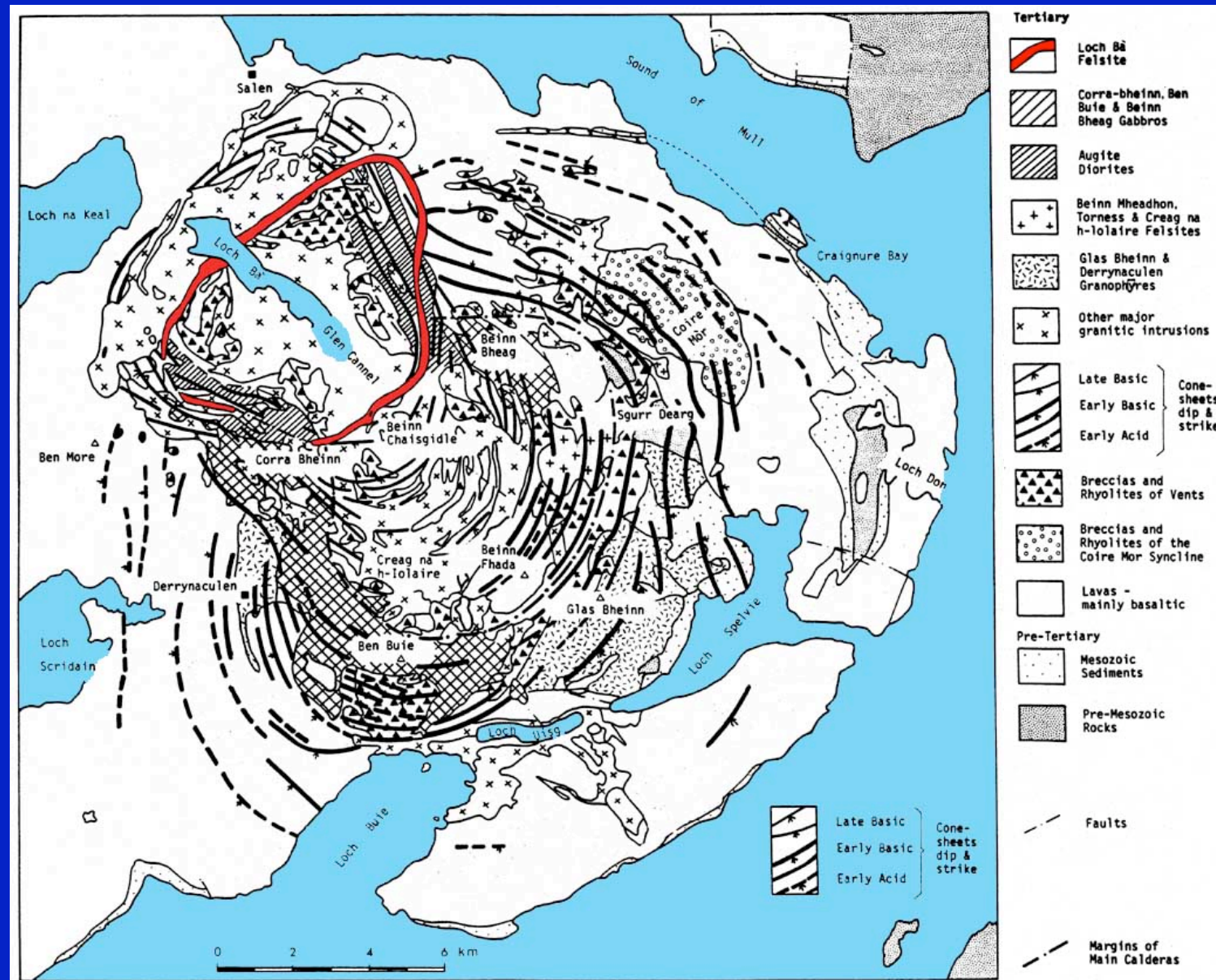


Figure 4-24. b. Cone sheets in the same area of Mull, after Ritchey (1961), *British Regional Geology. Scotland, the Tertiary Volcanic Districts*. Note that the yellow felsite ring dike in part (a) is shown as the red ring in the NW of part (b). British Geological Survey. (after Winter, 2001)

Modello e fasi di sviluppo di una zonatura normale in un plutone calc-alcantino

Camera magmatica zonata + ricarica
(after Zorpi et al., 1989)

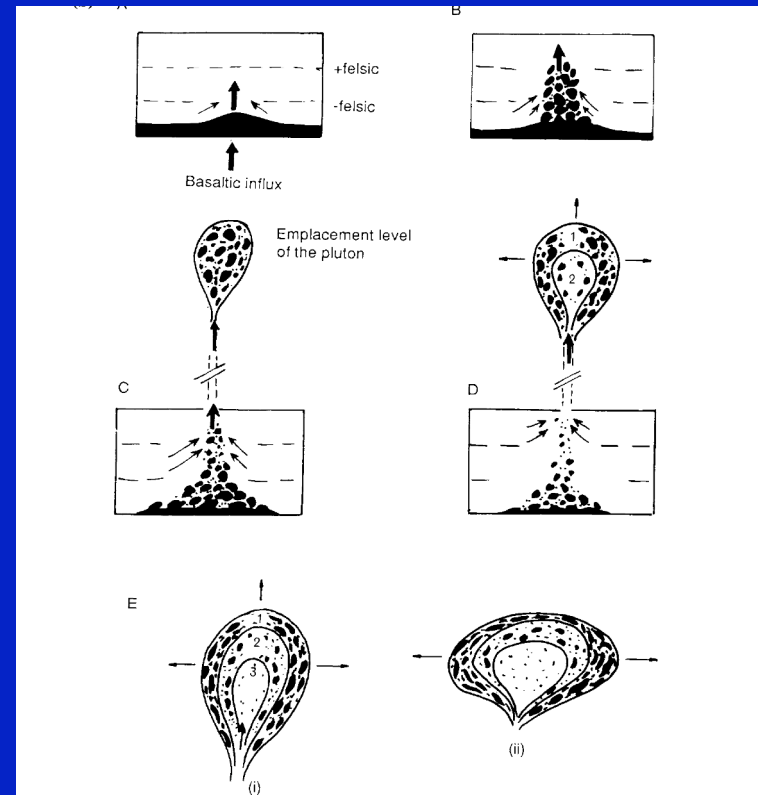
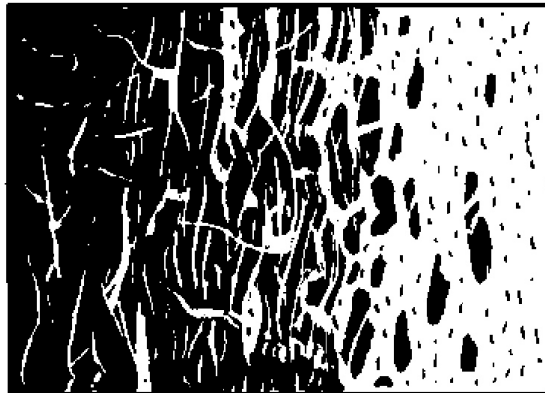


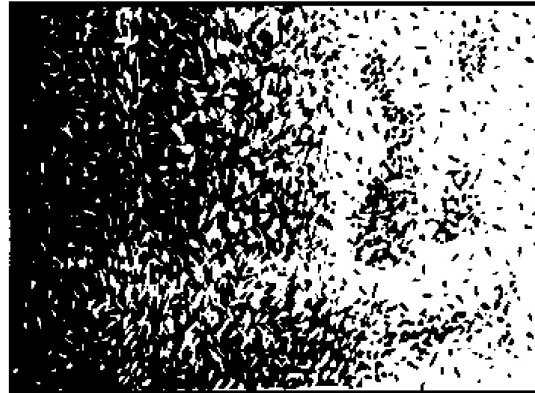
Figure 9.7 (b) Hypothetical model illustrating the phases in the development of normal zoning in calc-alkaline granitic plutons, from the withdrawal from a compositionally stratified acid chamber intruded by a basalt (with a given FeO_x/MgO ratio) to the final emplacement of the pluton. (A) Injection of basalt (possibly through a dyke system). Beginning of pillowing and of the ascent of the basalt through the chamber. For the sake of clarity, a simple flat-topped rectangular shape has been assumed for the acid magma chamber and three compositionally different zones have been represented. Thick and thin arrows represent the withdrawal streamlines of the basic and acid magmas, respectively. (B) The basalt influx is continuing but decreasing. Ascent of the basalt which is still pillowing and simultaneous partial removal of the deeper layer of the stratified acid magma. (C) Emplacement of a first magmatic pulse originating from the lower zones of the chamber and withdrawal of the middle zone of the reservoir. (D) Intrusion in the core of the ballooning pluton of a second magmatic pulse originating from the middle zone of the chamber and withdrawal of the upper zone. (E) Third magmatic pulse into the pluton's core (i) and last episode of lateral ballooning (ii). Reproduced from Zorpi *et al.* (1989) with the permission of the authors and Elsevier Science Publishers.

✓ Contatti esterni e *border zones* dei corpi intrusivi

❖ *Aureole di contatto*: interazione prevalentemente termica
Vs.



a. Injected



b. Permeated



c. Combination

❖ *Gradational border zones* between homogeneous igneous rock (light) and country rock (dark). Mechanical (a), thermal and chemical effects (c) after Winter, 2001.